

T. C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ST-37 TÜP PROFİLLERİNİN ÜÇ NOKTA EĞME ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYSEMA ÜNLÜ

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖGR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2022

10475293

T. C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BEHAVIOR OF ST-37 TUBE PROFILES UNDER THREE-POINT BENDING;
EXPERIMENTALLY AND NUMERICALLY**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYSEMA ÜNLÜ

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2022

10475293

BEYAN

“St-37 Tüp Profillerinin Üç Nokta Eğme Altındaki Davranışlarının Deneysel Ve Nümerik Olarak Değerlendirilmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.	
DESTEK ALINMIŞTIR	DESTEK ALINMAMIŞTIR
Destek alındı ise;	
Destekleyen kurum;	
Desteğin Türü	Proje Numarası
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	
2- TÜBİTAK	
Diğer;.....	
ETİK KURUL onayı var ise;	
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....

Aysema Ünlü

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Tez çalışmamın var oluşu, planlanması, araştırılması, yürütülmesi ve sonuçlanmasında akademik bilgi birikimi ve tecrübesi ile desteğini her daim koşulsuz ve şartsız, büyük bir özveri ve sabırla sunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Emre Esener'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca sayın danışman hocama idealist bir akademisyen olarak biz öğrencilerine hayat yolculuğumuzda bir pusula olduğu için, hedeflerime ve hayallerime ulaşmak adına göstermiş olduğum çabayı gördüğü, inandığı ve desteğini hiçbir şartta ve koşulda esirgemediği için, düşmenin de kalkmanın bir parçası olduğunu öğrettiği ve pes etmemenin keza başarısızlıkların başarının en büyük anahtarı olduğunu öğrettiği için sonsuz saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

Akademik hayatım boyunca sevgi, hoşgörü ve sabırla bana en büyük manevi desteği veren, bu zorlu yolculukta nazımı çeken, maddi ve manevi olarak her daim arkamda olan, hayallerime ve hedeflerimi gerçekleştireceğime benden daha çok inanan çok değerli aileme ve ailemin en minik üyesi, geleceğin savcısı Yağız Berat Ünlü' ye her daim yanımda oldukları için teşekkür ediyorum.

Okul sıralarına oturduğum ilk günden bugüne kadar üstün çaba ve özveri ile beni yetiştiren, başarının hayatta varış noktası değil de bir yolculuk olduğunu öğreten, çabanın ve azmin elinden hiçbir şeyin kurtulamayacağını söyleyen ve istediğim her başarıyı elde edebileceğime dair bana inanç veren ve güvenen birtanecik annem Aliye Ünlü ve canım babam Ekrem Ünlü' ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim hayatımın başından bugününe kadar sevgi, emek ve özveri ile hayatıma dokunan, ilkokul sırasında iken bugünleri gören, o günler de ektiği tohumları bugün yeşerttebildiğim için canım öğretmenim Filiz Hussi' ye ve tüm değerli öğretmenlerime teşekkürlerimi sunuyorum.

Aysema ÜNLÜ

2022

ÖZET

ST-37 TÜP PROFİLLERİNİN ÜÇ NOKTA EĞME ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

İnce cidarlı elemanlar yüksek mukavemet sergiledikleri ve enerji absorbe edebilme kapasiteleri yüksek olduğundan dolayı taşıyıcı yapılarda ve çarpışma kritik parçalarda yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Yaygın olarak kullanıldıkları başta otomotiv sektörü olmak üzere makine sanayinde bu elemanlardan beklenen dayanım ve enerji absorbe edebilme karakteristiğinden dolayı metalik malzemelerden imal edilmektedirler. Metalik malzemeler içerisinde ise bu beklentilere en yakın sonucu veren çelik sınıfı tercih edilmektedir. İnce cidarlı elemanlar kullanıldıkları taşıyıcı yapı ve çarpışma kritik parçalarda genellikle eğilme yüklemesine maruz kalmaktadır. Bu sebeple bu tez çalışmasında, ince cidarlı St37 malzemesinin üç nokta eğme yüklemesi altında davranışı farklı proses parametreleriyle deneysel ve nümerik olarak incelenmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu doğrultuda üç farklı kesit profili ve üç farklı destek aralığı mesafesi proses parametreleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca tüm prosesler Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve plastisite modellerinin ince cidarlı yapıların eğilme davranışını tahmin performansları ortaya konmuştur.

Tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmalar ve nümerik analizler sonucunda kuvvet-uzama grafikleri, moment-açı grafikleri, absorbe edilen enerji değerleri ve eş değer gerilme dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, parametrelerin değişimi ile farklılıklar sergilemiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, her üç kesit profili için de destek aralığı mesafesinin artması kuvvet değerlerinde düşüşe neden olurken, moment değerlerinin artmasına yol açmıştır. Ayrıca her üç kesit profili içinde absorbe edilen enerji değerleri 100 mm destek aralığında maksimum sonucu vermiştir. Nümerik analiz sonuçları incelendiğinde ise boru kesitli profilin deneysel kuvvet değerleri ve absorbe ettikleri enerji değerlerini Barlat-89 ve Hill-48 gerilme tabanlı modeli yakınsamıştır. Kare ve dikdörtgen kesit numunelerde ise hiçbir plastisite modeli deneysel sonuçları yakınsamamıştır.

Anahtar Kelimeler: İnce Cidarlı Yapılar, Üç Nokta Eğme, Sonlu Elemanlar Analizi, Yapısal Çelik.

ABSTRACT

BEHAVIOR OF ST-37 TUBE PROFILES UNDER THREE-POINT BENDING; EXPERIMENTALLY AND NUMERICALLY

Thin-walled elements are widely used in load-bearing structures and crash-critical parts, as they exhibit high strength and have a high energy absorption capacity. They are manufactured from metallic materials due to the strength and energy absorption characteristics expected from these elements in the machinery industry, especially in the automotive sector, where they are widely used. Among the metallic materials, the steel class that gives the closest result to these expectations is preferred. Thin-walled elements are often subjected to bending loading in the structural and collision critical parts in which they are used. For this reason, in this thesis, the behavior of thin-walled St37 material under three-point bending loading was investigated experimentally and numerically with different process parameters and compared with each other. Accordingly, three different cross-section profiles and three different support spacing distances were used as process parameters. In addition, all processes were analyzed using the finite element method using Hill-48 and Barlat-89 plasticity models, and the predictive performance of plasticity models for the bending behavior of thin-walled structures was revealed.

Force-stroke graphs, moment-angle graphs, energy values and equivalent stress distributions were obtained as a result of experimental studies and numerical analyzes carried out in the thesis study. The results obtained showed differences with the variation of the parameters. When the experimental results are examined, the increase in the support spacing distance for all three section profiles causes a decrease in the force values and an increase in the moment values. In addition, the energy values absorbed in all three cross-section profiles gave the maximum result in the span distance of 100 mm. When the numerical analysis results are examined, the experimental force values of the pipe section profile and the energy absorbed by the Barlat-89 and Hill-48 stress-based model converge. On the other hand, no plasticity model converged to the experimental results in square and rectangular section samples.

Keywords: Thin-Walled Structures, Three Point Bending, Finite Element Analysis, Structural Steel.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	x
1.GİRİŞ.....	1
2.KAPALI KESİTLİ PROFİLLER.....	13
2.1.Kapalı Profillerin İmalatı.....	15
2.1.1.Dikişsiz İmalat.....	15
2.1.2.Dikişli İmalat.....	18
2.2.Dikişli ve Dikişsiz Boru Üretimlerinin Karşılaştırılması.....	20
2.3.Kapalı Profillerin Kullanım Alanları.....	21
2.4.Kapalı Profillerin Mekanik Yük Altında Davranışları.....	22
2.5.Kapalı Profil İmalatında Kullanılan Malzemeler.....	24
2.6.Bölüm Değerlendirmesi.....	28
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	30
3.1.Plastisite Modelleri.....	35
3.1.1.Hill-48 Plastisite Modeli.....	36
3.1.2.Barlat-89 Plastisite Modeli.....	38
3.2.Bölüm Değerlendirmesi.....	38
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI.....	40
4.1.Deneysel Çalışmalar.....	40
4.2.Sonlu Elemanlar Analizleri.....	48

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	59
KAYNAKÇA.....	62



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Yapı Çelikleri ve Mekanik Özellikleri.....	27
Tablo 2.2. Yapı Çelikleri ve Kullanım Yerleri.....	28
Tablo 4.1. Farklı Kesit Profillerin enerji Değerleri.....	47



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yapı Mühendisliğinde Kullanılan İnce Cidarlı Taşıyıcı Elemanlar.....	3
Şekil 1.2. Otomotiv Çerçeve Yapısı.....	4
Şekil 1.3. Dolgulu Numuneler (Soldan Sağa Üst Çizgi): Boş Tüp, APM Köpük Dolgulu Tüp, Hibrid APM Köpük Dolgulu Tüp Ve MHSS Dolgulu Tüp.....	7
Şekil 1.4. Otomobil Boru Tüp Kullanımı.....	9
Şekil 1.5. Yapısal Uygulamalarda Boru Tüp Kullanımı.....	9
Şekil 2.1. Açık Profiller.....	13
Şekil 2.2. Kapalı Profiller.....	14
Şekil 2.3. Direkt Ekstrüzyon Prosesi.....	16
Şekil 2.4. İndirekt Ekstrüzyon Prosesi.....	16
Şekil 2.5. Profil Üretim Şeması.....	18
Şekil 2.6. Dikişli Boru Profil.....	21
Şekil 2.7. Dikişsiz Boru Profil.....	21
Şekil 2.8. Otomobil de Kullanılan İnce Cidarlı Elemanlar da Görülen En Yaygın Yükleme/Deformasyon Çeşitleri.....	23
Şekil 2.9. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Çelik Malzemeler.....	25
Şekil 3.1. Örnek Bir Sonlu Elemanlar Modeli.....	31
Şekil 3.2. Bir Çarpışma Testine Ait Sonlu Elemanlar Analizi.....	32
Şekil 3.3. Sonlu Elemanlar Analizi İş Akış Şeması.....	34
Şekil 4.1. Üç nokta Eğme Deneyi.....	40
Şekil 4.2. Numune Ölçü Teknik Resimleri.....	41
Şekil 4.3. Üç Farklı Kesite Sahip Deforme Olmamış Profiller.....	41
Şekil 4.4. Üç Farklı Kesite Sahip Deforme Olmuş Profiller.....	42
Şekil 4.5. Boru Kesit Profillerin Üç Farklı Destek Aralığında Deforme Olmuş Halleri.....	42
Şekil 4.6. Kare Kesit Profillerin Üç Farklı Destek Aralığında Deforme Olmuş Halleri.....	43
Şekil 4.7. Dikdörtgen Kesit Profillerin Üç Farklı Destek Aralığında Deforme Olmuş Halleri.....	43

Şekil 4.8. Boru Profil Kuvvet-Uzama Grafikleri.....	44
Şekil 4.9. Kare Profil Kuvvet-Uzama Grafikleri.....	44
Şekil 4.10. Dikdörtgen Profil Kuvvet-Uzama Grafikleri.....	45
Şekil 4.11. Boru Profil Moment-Açı Grafikleri.....	46
Şekil 4.12. Kare Profil Moment-Açı Grafikleri.....	46
Şekil 4.13. Dikdörtgen Profil Moment-Açı Grafikleri.....	47
Şekil 4.14. Üç nokta Eğme Deneyi Sonlu Elemanlar Modeli.....	48
Şekil 4.15. Boru Kesit Profilin Sonlu Elemanlar Modeli.....	49
Şekil 4.16. Kare Kesit Profilin Sonlu Elemanlar Modeli.....	49
Şekil 4.17. Dikdörtgen Kesit Profilin Sonlu Elemanlar Modeli.....	49
Şekil 4.18. 100 mm Destek Aralığında Boru Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	50
Şekil 4.19. 160 mm Destek Aralığında Boru Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	50
Şekil 4.20. 200 mm Destek Aralığında Boru Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	51
Şekil 4.21. 100 mm Destek Aralığında Kare Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	51
Şekil 4.22. 160 mm Destek Aralığında Kare Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	51
Şekil 4.23. 200 mm Destek Aralığında Kare Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	52
Şekil 4.24. 100 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	52
Şekil 4.25. 160 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	52
Şekil 4.26. 200 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması.....	53
Şekil 4.27. Nümerik analizler sonrasında boru kesitli profillerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanması.....	53

Şekil 4.28. Nümerik analizler sonrasında kare kesitli profillerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanması.....	54
Şekil 4.29. Nümerik analizler sonrasında dikdörtgen kesitli profillerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanması.....	54
Şekil 4.30. 100 mm Destek Aralığında Boru Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	55
Şekil 4.31. 160 mm Destek Aralığında Boru Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	55
Şekil 4.32. 200 mm Destek Aralığında Boru Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	55
Şekil 4.33. 100 mm Destek Aralığında Kare Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	56
Şekil 4.34. 160 mm Destek Aralığında Kare Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	56
Şekil 4.35. 200 mm Destek Aralığında Kare Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	56
Şekil 4.36. 100 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	57
Şekil 4.37. 160 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	57
Şekil 4.38. 200 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları.....	57

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

SEA: Specific Energy Absorption - Özgöl Enerji Absorbe Etme

EMC: Embedded Multi-Cell - Gömülü Çok Hücreli

TMC: Traditional Multi-Cell - Geleneksel Çok Hücreli

Al: Alüminyum

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic - Karbon Fiber Takviyeli Plastik

Pm: Mean Crushing Force – Ortalama Kırma Kuvveti

UF: Uniform Foam – Tek Tip Köpük Dolgu

FGF: Functionally Graded Foam - İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Köpük Dolgu

APM: Advanced Pore Morphology - Gelişmiş Gözenek Morfolojisi

MHSS: Metallic Hollow Sphere Structures - Metalik İçi Boş Küre Yapısı

St37: Yapı Çeliği

Fe: Iron - Demir

C: Carbon - Karbon

BH: Bake Hardening – Fırında Sertleştirilebilir

CP: Complex Phase – Karmaşık Fazlı

DP: Dual Phase – Çift Fazlı

MS: Martensitic Steel – Martensitik Çelik

TRIP: Transformation-Induced Plasticity – Dönüşüm Etkili Plastisite

TWIP: Twinning-Induced Plasticity – İkizlenme Etkili Plastisite

DIN: Deutsches Institut für Normung e. V. - Alman Standardizasyon Enstitüsü

SAE: Society of Automotive Engineers - Otomotiv Mühendisleri Birliği

AISI: American Iron and Steel Institute - Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

f: Bilinen Yük Vektörü

k: Sabitler Matrisi

u: Büyüklük Alanının Düğüm Noktasındaki Bilinmeyen Değeri

σ: Akma Gerilmesi Değeri

σ_0 : Hadde yönünde ki akma gerilmesi değeri
 σ_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki akma gerilmesi değeri
 σ_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki akma gerilmesi değeri
 σ_{12} : Çift Eksenli Akma Gerilmesi Değeri
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal Gerilmeler
 $\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$: Kayma Akma Gerilmeleri
 r : Anizotropi Katsayısı
 r_0 : Hadde yönünde ki anizotropi değeri
 r_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki anizotropi değeri
 r_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi değeri
 F, G, H, L, M ve N : Anizotropi katsayılarına ve akma gerilmelerine bağlı sabitler
 M : Malzemenin kristal kafes yapısına bağlı üstel
 a, c, h, k_1, k_2, p : Barlat-89 plastisite modeline bağlı katsayılar
 S : Destek aralığı
 t_1 : Boru Profil Et Kalınlığı
 Θ : Boru Profil Çağ Değeri
 t_2 : Kare Profil Et Kalınlığı
 a : Kare Profil Kenar Uzunluğu
 b : Dikdörtgen Profil Uzun Kenar Uzunluğu
 c : Dikdörtgen Profil Kısa Kenar Uzunluğu
 t_3 : Dikdörtgen Profil Et Kalınlığı
 M : Moment Değeri
 P : Zımba Kuvveti
 δ : Uzama Değeri
 θ : Açı (°C)
 J : Joule

1. GİRİŞ

Günümüzde otomobil, tren, havacılık, açık deniz yapıları, inşaat, askeri teçhizat gibi birçok endüstride düşük maliyet, yüksek mukavemet ve sertlik, hafiflik, yük taşıma verimliliği, çarpışma güvenliği, yüksek enerji absorbe edebilme kapasitesi özelliklerinden dolayı enerji emici yapısal bileşen olarak ince cidarlı yapılar yaygın kullanıma sahiptir (Zhang vd., 2015: 45). Çeşitli mühendislik uygulamalarında ince cidarlı elemanların enerji absorbe etme verimliliği ve çarpışma dirençleri analitik (Mo'tamedi vd., 2018: 560), sayısal (Yin vd., 2015: 2; Qi vd., 2016: 24), deneysel (Li vd., 2013: 1059; Hilditch vd., 2009:2317; Duarte vd., 2014:49) ve tasarım optimizasyonu (Zhang vd., 2018: 637; Zhang vd., 2016a: 113; Sun vd., 2015: 131) gibi birçok yöntemle araştırılmıştır. İnce cidarlı elemanların enerji absorbe edebilme kapasitelerinin araştırılması ve iyileştirilmesi adına çeşitli kesit geometrileri, dolgu maddesi ilavesi, çok hücreli kesitler, değişken cidar kalınlığı veya farklı malzeme konfigürasyonu gibi birçok değişken parametre üzerinde çalışmalar yapılmış olup halen yapılmaya devam edilmektedir (Zhang vd., 2018:637).

Günümüzde ince cidarlı elemanlar yapı tekniğinde kullanımı oldukça yaygın olan yapı elemanlarıdır. İnce cidarlı elemanların çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımının ekonomiye yaptığı katkısı sebebiyle diğer yapı elemanlarına göre önemli ölçüde avantaj sağlamaktadır. Taşıyıcı elemanlar, gövde ve baş kısımları farklı ebatlarda ayrı birer levha olarak imal edilmektedirler. İmal edilen bu malzemeler haddeleme prosesi ile birlikte yüksek dayanıma sahip, içi boş ve farklı geometrik şekillere sahip (I, T, L, IPE, UPE gibi) ince cidarlı yapılara dönüştürülmektedir. Yapılarda kullanılan bu şekillendirilmiş metal çubuklara profil denilmektedir (Eroğlu, 2019: 1). Yapıda tercihen bir profilin kullanılması, o profilin piyasada bulunabilirliğine bağlıdır. Profiller açık ve kapalı profiller olarak ikiye ayrılmaktadır. I, H, U, T vb. profiller açık profiller olarak adlandırılırken, kutu (kare, dikdörtgen, çokgen) ve boru profiller kapalı profiller olarak adlandırılmaktadır (Öztürk, 2008: 87). Kapalı profiller açık profillere göre daha hafif olup dış yüzey alanları daha az olduğundan yangın ve korozyon gibi kötü koşullara karşı koruma malzemesinin az kullanımı nedeni ile ekonomiktirler. Kutu ve boru profillerin burkulma atalet momenti açık kesitli profillere nazaran 200-500 kat arası daha fazladır (Wardenier vd., 2001). Boru ve kutu profillerin açık profillere kıyasla öne çıkmasının asıl sebebi, yüksek burulma ve burkulma dayanımlarının, özellikle boru profillerin kullanıldığı durumlarda malzemenin eleman eksenli boyunca düzgün dağılımı sonucunda, açık profillerde meydana gelen zayıf eksenlerin oluşmaması ve bu durumdan kaynaklanan son derece olumlu yapısal davranıştır (Ünver, 2003: 27). Bu avantajlara ek olarak, boru ve kutu gibi kapalı

profillerin, açık profillere nazaran daha büyük yüklere dayanım göstermeleri, sistem içinde kullanılacak malzemelerde büyük ölçüde tasarrufa olanak tanımaktadır. Kapalı profillerin yapılarda sağladıkları avantajlardan bir diğeri ise, elemanların doğrudan birbirine kaynaklanabilmesi ve böylelikle de bağ ve ek levhaları gibi birleşim elemanlarına ihtiyaç duyulmadan çözümlemelere imkan sağlamasıdır (Ünver, 2003: 28). Son olarak kapalı profillerin; tasarım kolaylığı, hafiflik, düşük fiyat ve dayanım gibi birçok farklı özelliği aynı anda bünyesinde barındırması bu elemanları avantajlı hale getirmektedir (Balta, 2016).

Kutu ve boru profiller darbeye maruz kaldıklarında enerji absorbe edebilme karakteristiğine sahip olduklarından başka bir deyişle enerji absorbe edici olarak görev alabildiklerinden otomotiv, havacılık gibi sektörde tercih edilmektedirler (Santhosh ve Manikandaraja, 2016: 187). Bunun yanı sıra çarpışma dirençlerinin yüksek olması ve çeşitli yöntemlerle enerji emilimi ve verimliliğini arttırmanın mümkün olması kapalı profillere olan talebi arttırmaktadır (Nagel ve Thambiratnam, 2004: 202). Kutu ve boru profiller bu sektörlerin yanı sıra mobilya ve makine sanayilerinde geniş kullanım alanlarına sahip malzemelerdir. Dolayısıyla bu yaygın kullanım boru/profil üretimini daha da önemli hale getirmektedir (Dökmeci ve Apay, 2017: 1376). Aynı zamanda kapalı profillerin yapısal dayanım özellikleri makine ve inşaat sektörlerinde de var olmalarının ve kullanılmalarının ana nedenidir. Kapalı profiller makine ve inşaat sektörlerinde; kafes yapıları, vinçler, konsol yapılar, köprüler, kolonlar, kubbeler, gökdelenler, endüstriyel sanayi yapıları gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadırlar (Eroğlu, 2019: 13). Şekil 1.1.'de yapı mühendisliğinde kullanılan ince cidarlı taşıyıcı elemanlara ait bir örnek verilmiştir. Kutu ve boru profiller kendi başlarına kolon olarak kullanılabildikleri gibi, günümüzde bu profillere beton dolgu maddesi ilave edilmektedir. Profillerin içlerinin betonla doldurulması, yük taşıma kapasitesini arttırırken aynı zamanda yangına karşı dayanıklılığı da arttırmaktadır (Öztürk, 2008: 61). İnce cidarlı yapısal elemanlar olarak adlandırılan kapalı profillerin yaygın kullanımı ile birlikte artan talebi karşılamaya yönelik olarak farklı mühendislik uygulamalarında birçok faaliyet yürütülmektedir. Bu faaliyetler kapsamında, ince cidarlı yapısal elemanların özelliklerinin iyileştirilmesi ve servis koşullarında davranışlarının belirlenmesi adına birçok farklı sektörde araştırma ve geliştirme faaliyetleri sürdürülmektedir.

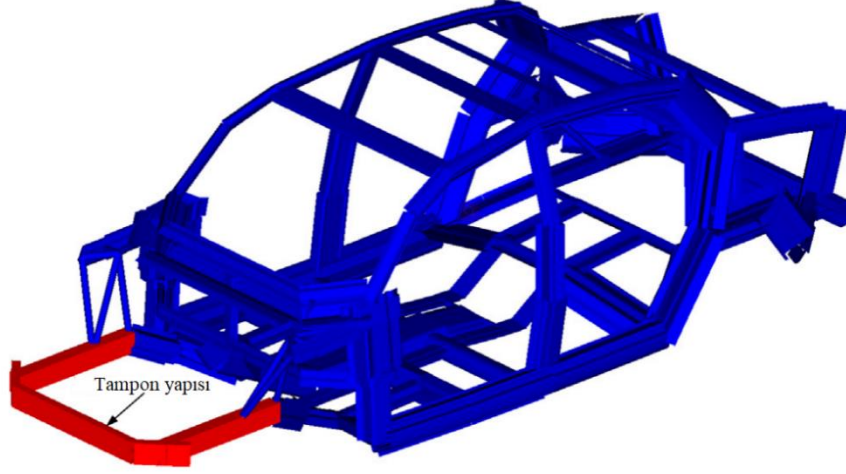


Şekil 1.1. Yapı mühendisliğinde kullanılan ince cidarlı taşıyıcı elemanlar

Kaynak: (Eroğlu, 2019: 1)

Günümüzde enerji emici yapısal bileşen olarak kullanılan ince cidarlı elemanların araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yoğun olarak sürdürüldüğü sektörlerin başında hareketli araç endüstrisi gelmektedir. İnce cidarlı elemanların enerji absorbe edebilme verimliliği, hafifliği ve çarpışma dayanımı özellikleri, bu elemanların yolcu güvenliği, araç performansı ve yakıt tasarrufu gibi etkenlerin hayati önem taşıdığı otomotiv sektöründe tercih edilmesinin ana sebebi olmuştur. Hareketli araç endüstrisinde enerji emici yapısal bileşen olarak kullanılan ince cidarlı elemanların çarpışma dayanımı alanında aksenal ezilmesi birçok farklı uygulamada incelenmiştir (Zhang vd., 2018: 728). Fakat gerçek çarpışma koşullarında nadiren aksenal ezilme meydana gelmektedir. Genellikle çarpışma koşullarında, ince cidarlı kirişler de yanal çökme meydana gelmektedir. İnce cidarlı kirişlerin eğilme deplasmanı, kaza sırasında çarpışma ile meydana gelen kinetik enerjiyi dağıtmak ve yolcuların veya yüklerin güvenliğini sağlamak adına en önemli deformasyon mekanizmalarından biridir (Zhang vd., 2016b: 67).

Örneğin otomobillerde kaza sırasında çarpmaya uğrayan ilk bileşen tampon kirişidir. Tampon kirişinin temel işlevi çarpışma enerjisini ve yükünü sol ve sağda bulunan çarpma kutularına dağıtmak ve önden gelen kayma darbesi sırasında yandaki deformasyonu azaltarak yolcu güvenliğini sağlamaktır. Çarpışma esnasında içi boş tampon kirişleri lokalize bir eğilme deplasmanı moduna girerler (Xiao vd., 2015: 81). Şekil 1.2.'de otomobil çerçeve yapısı ve tampon yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Otomotiv çerçeve yapısı [22]

Kaynak: (Bai vd., 2019: 186)

Eğilme deplasmanı deformasyonu genelde saf eğme ve üç-nokta eğme şekillerinde meydana gelmektedir. Saf eğmenin analizi, üç-nokta eğmeye kıyasla nispeten daha kolaydır. İlk olarak 1983 yılında (Kecman, 1983: 624) ince duvarlı dikdörtgen kesitli tüplerin saf eğme tepkisini tahmin etmek için teorik bir model önermiştir. İnce cidarlı yapıların eğilme deformasyonu detaylı olarak incelenerek sabit ve hareketli menteşe hatları konsepti önerilmiştir. (Kim ve Reid, 2001: 1898), Kecman'ın teorik modeline dayanarak dikdörtgen ince duvarlı yapıların eğilme momenti için teorik tahmin formüllerini geliştirmişlerdir. Bununla birlikte, gerçek durumlarda saf eğilme deplasmanı ile nadiren karşılaşıldığından, bu teoriler gerçek çarpışma olayları için yetersiz kalmaktadır. Üç-nokta eğme analizi değişken eğilme momenti ve farklı enine kesitlerde kesme kuvvetleri içerdiğinden ötürü saf eğmeye kıyasla daha karmaşıktır (Huang ve Zhang, 2018: 461). Bu nedenle ince cidarlı yapıların eğilme davranışını (üç-nokta eğilme, dört-nokta eğilme) incelemek ve geliştirmek mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır.

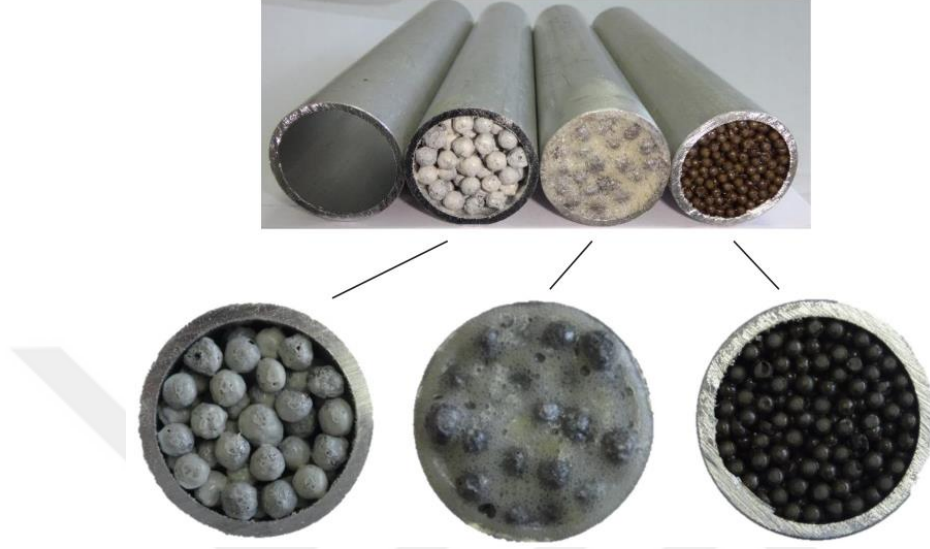
Bu kapsamda çeşitli mühendislik uygulamalarında ince cidarlı kirişlerin eğilme davranışını geliştirmek, elemanların çarpışma dayanımı performansını iyileştirirken aynı zamanda enerji absorbe edebilme kapasitelerini de arttırmak maksadıyla farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri; ince cidarlı elemanları çok hücreli tüp haline getirmektir. Çok hücreli tüpler tek hücreli tüplerle kıyaslandığında daha avantajlıdır. Çünkü çok hücreli tüplerin hem eksenel ezilme direnci hem de SEA (specific energy absorption-özellik enerji absorbe etme) verimliliği tek hücrelilere kıyasla çok daha yüksektir.

Bu konu üzerine yapılan bir çalışmada, (Zhang vd., 2018: 729) içi boş tüp, EMC (embedded multi-cell-gömülü çok hücreli) tüp ve TMC (traditional multi-cell-geleneksel çok hücreli) tüplerin üç nokta eğme davranışlarını incelemiştir. EMC tüplerin, içi boş tüplere kıyasla çok daha yüksek ortalama kırma kuvveti ve SEA değeri gösterdiğini tespit etmiştir. EMC tüpleri oluşturmak için dört hücreli ve dokuz hücreli yapılar oluşturmuşlardır. Dört ve dokuz hücreli yapılar benzer deformasyon göstermiş ve her ikisi de bükülme yüklerine maruz kaldıklarında deformasyona direnecek kadar güçlü oldukları görülmüştür. Fakat dokuz hücreli tüpler dört hücreli tüplere göre daha ağır olduklarından daha düşük SEA değeri göstermişlerdir. Bununla birlikte TMC tüplerin de üç nokta eğme altında iyi bir performans sergilediğini göstermişlerdir. TMC ve EMC tüpleri karşılaştırmışlar ve EMC tüplerin bükülme direnci aynı kesite sahip TMC tüplere göre daha düşük olduğunu vurgulamışlardır. Aynı zamanda TMC tüplerin kuvvet seviyelerinin de EMC tüplerinkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu gösterilmiştir. İnce cidarlı elemanları çok hücreli tüpler haline getirmek çarpışma dayanımını arttırmaya yönelik tipik bir yöntemdir. Aynı zamanda ince cidarlı elemanları kompozitler ile kaplamak da bu alanda uygulanan başka bir yöntemdir. Bu iki yöntemi bir araya getirerek (Huang vd., 2020a: 4) ince cidarlı elemanların çarpışma dayanımını incelemiştir. Çalışma kapsamında, yarı statik ve dinamik yükleme altında Al (alüminyum) / CFRP (carbon fiber reinforced plastic-karbon fiber takviyeli plastik) tüplerin eğilme deplasmanını ve çarpışma dayanımını incelemiştir. Tek, çift hücreli ve dört hücreli kesitli CFRP, Al ve Al/CFRP tüpleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Al tüpün cidar kalınlığının, kısmi kaplama ve kesit şeklinin, Al/CFRP tüplerinin deformasyon modeli ve kuvvet tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, CFRP katlarının sayısı ve yükleme hızının nispeten küçük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. CFRP tüplerin, yükleme esnasında kırılmalarından dolayı enerji emilimi için verimli olmadıklarını fakat CFRP kaplı Al tüplerin P_m (mean crushing force- ortalama kırma kuvveti)'si %12-%41 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Al/CFRP tüplerinin özgül enerji emilimi, kısmi CFRP kaplaması eklenerek %11 arttırılabilirken, Al tüplerin eğilme direnci, CFRP iyileştirmesi ile % 41'e kadar arttırılmıştır. Her durumda, çok hücreli Al/CFRP tüpleri, çarpışmaya dayanıklılık performanslarında tek hücreli muadillerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. İnce cidarlı elemanları çok hücreli elemanlar haline getirmenin yaygın başka bir yöntemi ise petek ve sandviç yapılarıdır. Petek ve sandviç yapılar, uçaklar, yüksek hızlı trenler ve diğer hafif araçlar gibi ağırlığa duyarlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tür hafif yapıların temel avantajları, petekler için yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül enerji emilimi ve bal peteği çekirdekli sandviç yapılar için yüksek eğilme sertliği ve eğilme mukavemetidir. Bu

kapsam da (Zhang vd., 2019: 193) alüminyum peteğin mekanik özelliklerini geliştirmek için ince duvarlı metalik tüp kullanmışlardır ve yeni bir tüp takviyeli petek yapısı oluşturmuşlardır. Tüp takviyeli petek yapısı boş petek ile karşılaştırıldığında, normalleştirilmiş tepe gerilimi, elastik modül ve özgül enerji emiliminin tüp takviyesi yardımı ile sırasıyla %16, %26 ve %73 oranında arttırılabildiği vurgulanmıştır. Boru takviyeli sandviç kirişin normalleştirilmiş tepe bükme yükü ve sertliği, boş sandviç kirişe kıyasla sırasıyla %42 ve %62 oranında artmıştır.

İnce cidarlı elemanları çok hücreli hale getirmek yerine kullanılabilecek etkili bir başka yaklaşım ise dolgu maddesi ilave etmektir. Böylece ince cidarlı yapıların yük taşıma kapasitesini ve enerji absorbe etme verimliliğini arttırmak mümkün olmaktadır. Literatürde dolgu olarak birçok farklı yapı kullanılmaktadır. Köpük dolgu (Yin vd., 2015), işlevsel olarak derecelendirilmiş köpük dolgu (Xiao vd., 2015), tüp dolgu (Xiong ve Hui, 2018), dairesel veya kare boru dolgu (Xiang vd., 2015), beton dolgu (Wang vd., 2020) ve bal peteği dolgu (Liu vd., 2017) enerji emici yapılarda enerji absorbe etme verimini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu dolgular arasında literatürde en yaygın kullanılan köpük dolgu olup köpük dolgu malzemesi olarak alüminyum köpük tercih edilmiştir (Zhang vd., 2015; Mo'tamedi vd., 2018; Yin vd., 2015; Xiao vd., 2015; Reyes vd., 2004; Crupi ve Montanini, 2007). Bu kullanımın amacı metalik köpüklerin, olağanüstü enerji soğurma kapasiteleri ve hafiflik potansiyelleri nedeniyle avantajlı kullanıma sahip olmalarıdır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada; (Fang vd., 2014: 266) alüminyum köpük dolgunun, enerji emilimini ve deformasyon modelleri açısından bükülme davranışını önemli ölçüde değiştirebileceği sonucuna varmışlardır. UF (uniform foam-tek tip köpük dolgu) ve FGF (functionally graded foam-işlevsel olarak derecelendirilmiş köpük dolgu) üzerinde çalışmışlardır. FGF tüpün UF tüpe kıyasla daha fazla enerji emdiği fakat UF tüpten daha büyük kuvvet üreteceği bulunmuştur. (Vesenjak vd., 2020: 2) alüminyum alaşımından yapılmış ince cidarlı tüplerin eğilme davranışlarını farklı dolgu maddeleri ilave ederek incelemişlerdir. Bu kapsamda dolgu maddesi olarak APM (Advanced Pore Morphology -Gelişmiş Gözenek Morfolojisi) köpük elemanları, hibrit APM köpük elemanları ve MHSS (Metallic Hollow Sphere Structures- Metalik İçi Boş Küre Yapısı) gibi hücreli metaller kullanmışlardır. APM köpük dolgulu tüpler, herhangi bir görünür çatlak oluşmadan test edilen yükleme oranlarında aynı davranışı sergilemektedirler. Hibrit APM köpük dolgulu tüpler, dış tüpte tek bir görünür çatlak meydana gelen yarı statik ve dinamik yükleme koşullarında aynı deformasyon ve hasar modu sergilemişlerdir. Çatlağın hızlı yayılması, nihayetinde kompozit tüp yapısının aniden bozulmasına neden olmuştur. Yarı statik ve dinamik yükleme altında MHSS dolu tüplerin deformasyon ve hasar modları, yükleme hızından bağımsız olarak benzer

deformasyon ve hasar modları göstermiştir. MHSS dolgulu tüpler, herhangi bir görünür çatlak olmaksızın yüksek süneklik sergilemişlerdir. APM ve MHSS dolgulu borular, öngörülebilir bir arıza ile çok daha sünek kırılma deformasyonu göstermişlerdir. Şekil 1.3.'de farklı dolgu maddesi ilave edilen tüpler gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Dolgulu numuneler (soldan sağa üst çizgi): Boş tüp, APM köpük dolgulu tüp, Hibrid APM köpük dolgulu tüp ve MHSS dolgulu tüp

Kaynak: (Vesenjak vd., 2020: 3)

İnce cidarlı elemanları köpükle doldurmak enerji absorbe etme verimliliğini artırırken ağırlıkta da önemli bir kazanç sağlamaya yaramaktadır. Fakat elemanları bir dolgu maddesi ilave etmeden de ağırlıkta kazanç sağlarken yapısal dayanımını arttırmak mümkün olabilmektedir. Bu yaklaşım ile ince cidarlı elemanların yapımında kullanılan malzemeler devreye girmektedir. Geçmişten günümüze yapısal elemanların ana malzemesi çoğunlukla çelik sınıfı olmuştur. Ağırlıkta kısa vadeli azalma daha yüksek mukavemetli çelikler kullanılarak elde edilebilirken, alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi daha düşük yoğunluklu malzemeleri içeren tasarımlar daha önemli tasarruf sağlamaktadır. Çelik kullanımı mukavemet ve sertlik açısından bu hafif metallere göre bir avantaja sahipken, kalınlığın yüksek olduğu uygulamalarda alüminyum ve magnezyum kütle tasarrufu sağlamaktadır. Bugüne kadar ince cidarlı elemanların üretiminde yaygın olarak çelik (Zhang vd., 2015; Xiao vd., 2015; Kim ve Reid, 2001; Mamalis vd., 2008; Mamalis vd., 2006; Kotelko vd., 2000; Zhang vd., 2018) ve alüminyum (Qi vd., 2016; Zhang vd., 2018; Reyes vd., 2004; Crupi ve Montanini, 2007; Fang vd., 2014; Wang vd., 2016) kullanılmıştır. Günümüzün gelişen malzeme teknolojisi ile birlikte ağır metalik malzemelerin yerini alüminyum alaşımı, magnezyum alaşımı ve fiber takviyeli plastik kompozit malzemeler gibi hafif malzemeler almıştır. Bu yaklaşım ile yapılan bir

çalışmada; (Zhu vd., 2017: 368) CFRP (Carbon fibre reinforced plastic-Karbon fiber takviyeli plastik) kompozit malzemenin üç-nokta eğme davranışını incelemişler ve optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Optimize edilmiş CFRP tampon kirişinin, yüksek mukavemetli çelik tampon kirişi ve tek tip CFRP tampon kirişine kıyasla sırasıyla % 51,7 ve % 7,5'e varan maksimum ağırlık azaltma ile çarpışmaya karşı dayanıklılığın tüm gereksinimlerini karşıladığını göstermişlerdir.

İnce cidarlı elemanların üç-nokta eğme davranışlarında malzemenin yanı sıra geometrinin etkisi de kaçınılmazdır. Günümüzde dairesel (Sun vd., 2015: 131), dikdörtgen (Huang ve Zhang, 2018: 462), kare (Xiong and Hui, 2018: 166), şapka kesitli (Chen vd., 2020: 3), sandviç (Wang vd., 2019: 64) gibi birçok şekilde ince cidarlı elemanların üretimi yapılmaktadır. Fakat incelenen birçok çalışmada tek tip geometri kullanıldığı başka bir ifadeyle geometrinin ince cidarlı elemanlar üzerindeki etkisinin açıkça gösterilmediği görülmektedir (Zhang vd., 2018: 636; Kim ve Reid, 2001: 1898; Mamalis vd., 2008: 114; Mamalis vd., 2006: 41; Wang vd., 2016: 289). İnce cidarlı elemanların geometrisi üzerine bir pazar araştırması yapıldığında boru tüp formlarının diğer formlara nazaran yaygın kullanımına rastlanılmıştır. İnce cidarlı elemanların boru tüp formu özellikle otomobil sektöründe yaygın kullanıma sahiptir. Öyledir ki her araç başına 40 kg boru tüp düşmektedir (Arcelormittal, 2021). Otomobillerde boru tüplerin kullanımı ile kaynak sayısı azaltılmakta buna bağlı olarak üretim süreçlerinde zamandan ve maliyetten tasarruf edinilmektedir. Aynı zamanda boru tüplerin yapısal dayanımı ile yapının gücü artırılarak güvenlik talepleri karşılanabilir. Son olarak da optimize edilmiş bağlantı sayısı ile boru tüplerin nispi ağırlığı araç ağırlığını azaltır ve bu da CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olur. Aşağıda Şekil 1.4.'de bir otomobilde kullanılan boru tüp formu gösterilmektedir. İnce cidarlı elemanların boru tüp formunun kullanıldığı diğer endüstriyel alanlar; yapısal uygulamalar, ağır inşaat ekipmanları, iskele ve eskrim, depolama sistemleri, tarım makineleri ekipmanları, endüstriyel sıvı tesisatları şeklinde verilebilir (Arcelormittal, 2021). Şekil 1.5.'de ince cidarlı boru tüp elemanların yapısal uygulamalarda kullanımına bir örnek verilmiştir.



Şekil 1.4. Otomobil boru tüp kullanımı

Kaynak: (Arcelormittal, 2021)



Şekil 1.5. Yapısal uygulamalarda boru tüp kullanımı

Kaynak: (Arcelormittal, 2021)

Literatür çalışmaları genel kapsamda incelendiğinde, ince cidarlı kirişlerin eğilme davranışlarının geliştirilmesi, çarpışma dayanımının ve enerji absorbe etme verimliliğinin artırılması amacıyla dolgu maddesi ilavesi, çok hücreli yapılar, farklı malzeme konfigürasyonu gibi ek bir veya birden fazla prosese yer verildiği gözlemlenmiştir. Fakat ince cidarlı elemanların eğilme özelliklerinin geliştirilmesi ek bir proses ve maliyet olmadan da mümkündür. Bu kapsamda içi boş-tek hücreli tüplerin proses parametreleri ile optimize edilmesiyle uygun sonuçlar elde edilebilmektedir.

Örneğin bu kapsamda yapılan bir çalışmada; (Huang vd., 2020b: 3) ince cidarlı alüminyum kare-boş tüplerinin eğilme davranışını incelemiş ve proses parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Farklı proses parametreleri (zımba şekli ve boyutu, yük hızı, yük açısı, yük konumu ve sınır şartları gibi) incelendiğinde, bu parametreler ile ince cidarlı kare tüplerin ortalama ezme kuvvetinin %78'e kadar arttırılabildiğini bulmuşlardır. Böylece ek bir proses, ek bir ağırlık (dolgu, hücre, vb.), zaman ve maliyet kaybı olmaksızın, içi boş tüp malzemelerin optimize edilmiş proses parametreleri ile uygun sonuçlar verebileceği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda içi-boş ince cidarlı kirişleri yapısal çelik malzemesi ile üretmek de eğilme davranışını geliştirmede bir başka etkili yöntem olabilir. Bu yapısal elemanların üretiminde çekme dayanımları, akma sınırları, konstrüksiyon dayanımları sayesinde karbon çelikleri büyük öneme sahiptir. Bu çelikler içerisinde yeterli mukavemeti sağlamaları, darbe dayancı, tokluk, maliyet ve bulunabilirlik avantajları sayesinde yapı çeliği olarak adlandırılan St37 çelikleri öne çıkmaktadır (Solomon vd., 2017: 1; Yazdani vd., 2015: 2). St37 çeliklerinin mekanik mukavemetlerinin yüksek olması sebebiyle bulonlar, somunlar ve pullar gibi birleşim elemanlarında kullanılmaktadır (Güler, 2005: 39). Burçlar, çarklar, kanatlar ve diş kılavuzları gibi elemanların imalatında da St37 çeliği tercih edilmektedir (Çeçil ve Şen, 2002: 114). Mekanik mukavemet ve süneklik gibi özellikler sebebi ile otomotiv sektörü de St37 çeliğini kullanmaktadır. Otomotiv Endüstrisinde geleneksel yolcu koltuklarının büyük bir kısmında koltuk şasesi St-37 çeliğinden üretilmiş profillerin kaynaklı bağlantısı ile meydana gelmektedir. Koltuğun araç tabanı ile bağlantısını sağlayan koltuk ayağı, koltuğu oluşturan temel unsurlardan biridir. Geleneksel koltuk yapısında St-37 çelik sacdan üretilen bu yapı kaynak bağlantısı ile koltuğun şasesine bağlanır (Yüce, 2013: 45). Ayrıca otomobil kaportalarının imalatında da St37 çeliği kullanılmaktadır (Bahman ve Alialhosseini, 2010: 1162). Bu çeliklerin özellikle elastisite modülünün yüksek olması, mekanik mukavemetleri ve süneklik özellikleri, St37 çeliğini ince cidarlı kirişlerin üretiminde avantajlı hale getirmektedir. Fakat ince cidarlı kirişlerin eğilme davranışını inceleyen literatürde ki çalışmalar göz önüne alındığında, kullanılan yapısal çelikler içerisinde St37 yapısal çeliğinin eğilme davranışının incelendiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

İnce cidarlı kirişlerin malzeme davranışı birçok mühendislik uygulamalarında deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Fakat günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte malzeme davranışının nümerik olarak da hesaplanabilmesi mümkün olmaktadır. Günümüzde nümerik analiz ile birlikte malzeme üretiminde meydana gelebilecek hataların tasarım aşamasında tespit edilip telafi edilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Tasarım aşamasında

tahmin-telafi yönteminin gelişmesi hatasız ürün formu elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Böylece deneme-yanılma sürecinde meydana gelebilecek zaman ve maliyet kayıplarının azaltılması mümkün olmaktadır. Günümüzde bu amaçla en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizidir (Esener, 2015: 11). Sonlu elemanlar analizi, karmaşık bir yapının basit sonlu elemanlara ayrılması sonrasında belirli sınır şartları ve dış yükler altında malzeme davranışının tahmin edilmesini içeren sayısal bir yöntemdir (Esener, 2020: 173). Sonlu elemanlar analizleri tahmin sonuçları, imalata karar verme ve gerçekleştirebilme adına oldukça önemlidir. Bu nedenle yapılan sonlu elemanlar analizleri tahminlerinin hassas sonuçlar vermesi oldukça önemlidir. Tahmin hassasiyetine etki eden iki önemli unsur; malzeme davranışının modellenmesi ve sonlu elemanlar parametreleridir. Malzeme davranışının doğru ve hassas şekilde modellenmesi tahmin hassasiyetini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Şekillendirme süreçlerinde, malzemede meydana gelen plastik deformasyonların modellenenebilmesi ise malzemenin davranışını tanımlayan plastisite modelleri ile mümkün olmaktadır. Plastisite modelleri çözüm hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Tahmin hassasiyetini etkileyen ikinci unsur ise sonlu elemanlar hesaplama parametreleridir. Sonlu elemanlar modelleri hesaplama parametreleri; eleman boyutu, integrasyon nokta sayısı, eleman formülasyonu, zaman adımı büyüklüğü ve vb. gibi parametreler olup bu parametreler doğrudan çözüm hassasiyetine etki etmektedir. Sonlu elemanlar analizleri birçok mühendislik uygulamalarında halihazırda kullanılmaktadır. İnce cidarlı elemanların analizlerinde de sonlu elemanlar analizi kullanılmaktadır.

İnce cidarlı elemanların sonlu elemanlar analizi ile modellenmesi çarpışma anında mesnet noktalarının belirlenmesi ya da uygun geometrinin seçilmesi adına tekrar tekrar deney yapılmaması yönünden önemli olup, zaman ve maliyet kazancı sağlayabilmek adına da tercih edilmektedir. Literatürde ince cidarlı kirişlerin sonlu elemanlar analizi çalışmaları incelendiğinde; genellikle non-lineer explicit (açık) sonlu elemanlar kodu kullanılmış olup, Belytschko-Tsay 4 düğümlü kabuk eleman tercih edilmiştir (Qi vd., 2016: 24; Sun vd., 2015: 130; Zhang vd., 2018: 425). Bu kapsamda çalışmalarda genellikle, ağ hassasiyeti çalışmaları yapılmış ve malzeme modeli olarak “Parçalı Doğrusal İzotropik Plastisite Modeli” kullanılmıştır (Zhang vd., 2018: 730; Xiong ve Hui, 2018: 170; Huang vd., 2020: 4; Huang ve Zhang, 2019: 235). Genellikle ağ hassasiyeti üzerine çalışmalar yoğunlaşmış olup (Zhang vd., 2018: 730; Huang vd., 2020: 3; Huang ve Zhang, 2019: 235) plastisite modellerinin ve pekleşme modellerinin birbirleri ile kıyaslanmasının yapıldığı az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır (Reyes vd., 2004: 815; Zhu vd., 2012: 251).

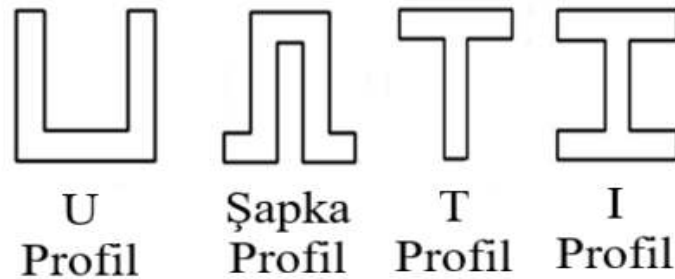
Tez çalışmasında, giriş bölümünde anlatılanlar ışığında, ince cidarlı elemanların üç-nokta eğme davranışı çalışılmıştır. Literatür eksikliği göz önüne alındığında yapısal çelik sınıfına dahil olan St37 çelikten imal edilen ince cidarlı elemanların üç-nokta eğme davranışı birçok farklı parametre kullanılarak incelenmiştir. Malzeme davranışının tanımlanması adına farklı plastisite modelleri ile nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Böylece St37 çeliğinden imal edilmiş içi-boş ince cidarlı elemanların üç-nokta eğme davranışı deneysel, parametrik ve nümerik olarak incelenmiştir.



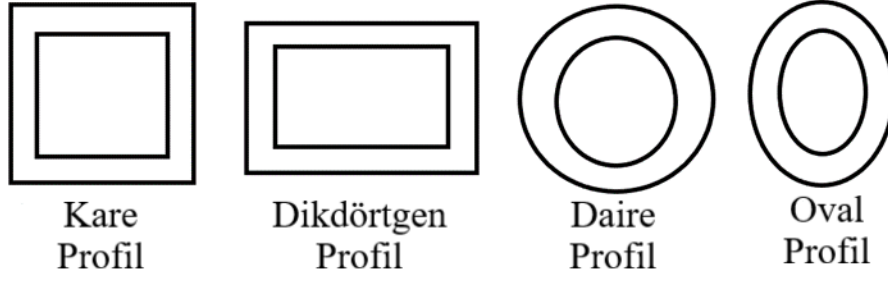
2. KAPALI KESİTLİ PROFİLLER

Sahip oldukları yük taşıma kapasiteleri ve çarpışma direncini absorbe edebilme özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulunan farklı kesitli malzemelere profiller denilmektedir. Profiller sahip olduğu gelişmiş yük taşıma kapasiteleri nedeniyle taşıyıcı konstrüksiyon yapılarında vinç, kiriş (yatay elemanlar) ve kolon (dikey elemanlar) gibi elemanlarda tercih edilmektedir. Aynı zamanda profillerin çarpışma direncini absorbe edebilme kabiliyetleri ise otomotiv sektöründe özellikle şasi yapılarında (şasilerin çarpışma kritik parçalarında) tercih edilmelerinin nedeni olarak öne çıkmaktadır. Profillerin hem taşıyıcı konstrüksiyonlarda hem de çarpışma kritik parçalarda yaygın olarak kullanılması sebebiyle, profil üretiminde ağırlıklı olarak metalik malzemeler tercih edilmektedir. Aynı zamanda profillerden yüksek mukavemet beklentisi olduğundan, bu beklentiyi karşılayabilmek adına profil üretiminde metalik malzemelerden çelikler tercih edilmektedir (Bozacı, 2007:1).

Profiller boy, et kalınlığı, malzeme, vs. gibi birçok özellikleri bakımından değişkenlik gösterebilir de genellikle bir kesit geometrisini temsil etmektedirler. Bunun nedeni, profillerin temelde kesit geometrilerine göre ayrışmaları ve adlandırılmalarıdır. Profillerin kesit geometrilerinin değişkenlik göstermesi sahip oldukları özellikler açısından farklılıklar ortaya koymaktadır. Şöyle ki, farklı kesit geometrisine sahip profillerin yük taşıma kapasiteleri de değişkenlik gösterecektir. Aynı zamanda kesit geometrisine paralel olarak atalet (polar atalet de dahil) değişeceğinden dolayı eğilme ve burulma davranışları da değişkenlik gösterecektir. Bu nedenle profiller kullanıldıkları yerlere göre farklı kesitlerde yer almaktadırlar. Temel olarak profiller, açık kesitli profiller ve kapalı kesitli profiller olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık kesitli profiller, I, H, U, T ve C gibi profillerdir. Kapalı kesitli profiller kare, dikdörtgen, daire, elips, oval ya da daha özel formlarda üretilen profillerdir (Bozacı, 2019: 4). Şekil 2.1.'de açık profillere ve Şekil 2.2.'de kapalı profillere ait bazı örnekler verilmektedir.



Şekil 2.1. Açık Profiller



Şekil 2.2. Kapalı Profiller

Açık kesitli profiller, çeşitli bağlantı elemanları kullanılarak (perçin, bulon, cıvata vb.) birbirlerine istenilen şekilde montaj edilmektedirler. Açık kesitli profillerin bu avantajı birçok farklı mühendislik uygulamalarında tercih edilmelerinin ana sebebini oluşturmaktadır. Açık kesitli profiller yük taşıma kapasitelerinin zayıf olması nedeni ile doğrudan taşıyıcı eleman olarak kullanılamamakla birlikte duvar ve döşeme kaplamaları gibi yapılarda taşıyıcı elemanlara yardımcı sistem görevi görmektedirler. Bağlantı elemanları yardımı ile birçok farklı yapıda çelik çerçeve, çelik karkas sistemi oluşturulabilmesi ile mimari ve estetik açıdan da avantajlı hale gelmektedir. Fakat açık profillerin kullanıldıkları yapı sektöründe yangın ve korozyon gibi kötü koşullara dayanım göstermeleri adına ek koruyucu malzemeler gerekmekte ve ek bir maliyet kalemi açığa çıkmaktadır. Bu dezavantajının yanı sıra açık kesitli profiller, burkulma momentlerinin düşük olması, yük taşıma kapasitelerinin düşük olması, birleştirilmeleri sırasında kullanılan ek elemanların maliyeti gibi dezavantajları da barındırmaktadırlar. Kapalı profiller yapıları itibari ile açık profillerdeki gibi ek birleştirme elemanlarına ihtiyaç duymazlar. Ayrıca yangın ve korozyon için de ek bir koruma malzemesi gerekmemektedir. Dolayısıyla kapalı profiller maliyet açısından açık profillere göre öne geçmektedir. Ayrıca kapalı profillerden özellikle boru kesitli profillerin burulma ve burkulma dayanımları çok yüksektir. Yüksek oranda yük taşıma kapasitelerinden dolayı taşıyıcı sistemlerde doğrudan kullanıma uygundurlar. Aynı zamanda kapalı profiller açık profillere nazaran; tasarım kolaylığı, hafiflik, düşük fiyat ve çarpışma direncini absorbe edebilmeleri gibi sahip oldukları birçok avantaj neticesinde günümüzde giderek daha yaygın ve avantajlı hale gelmektedirler. Kapalı profillerin çarpışma kritik parçalar ve taşıyıcı sistemlerde önemi ve yeri yadsınamazdır. Bu nedenle kapalı profillerin üretimi, istenilen kalite ve toleranslarda hatasız ürün formu elde etmeyi gerektirmektedir. Ayrıca kapalı profillerin servis koşullarında nasıl bir davranış sergileyeceklerinin bilinmesi de mühendislik açısından büyük oranda önem arz etmektedir.

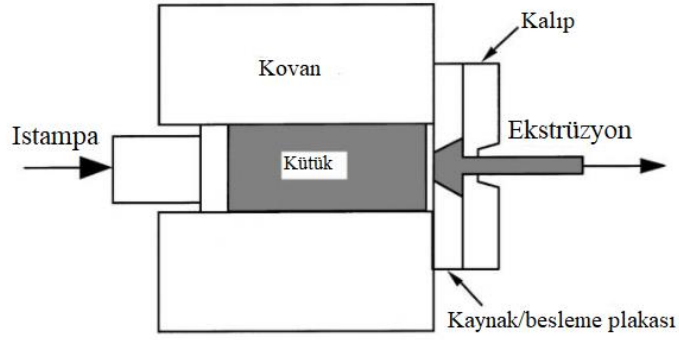
2.1. Kapalı Profillerin İmalatı

Kapalı profillerin imalatı temelde iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler “Dikişli imalat” ve “Dikişsiz imalat” olarak adlandırılmaktadır (URL-1, 2021). Dikişli imalat yönteminde sac parçalar istenilen formda kıvrılıp kenarları kaynak tekniği ile birleştirilmektedir. Dikişsiz imalat yönteminde ise ekstrüzyon ya da özel haddeleme yöntemi kullanılarak silindirik metal bloklardan kapalı profiller elde edilmektedir. Dikişli profiller çoğunlukla çelik malzemelerden üretilirken, dikişsiz profiller çelik malzemelerin yanı sıra tüm demir dışı metalik malzemelerden üretilebilmektedirler (Anık, 19).

2.1.1. Dikişsiz İmalat

Dikişsiz profiller form verilebilen çelik malzemelerden kaynak dikişi yapılmaksızın üretilen profillerdir. Bu profiller çeliklere sıcak işlem uygulanması ile üretilirler. Ancak çok yumuşak metalik malzemelerde soğuk işlemle de üretim yapılmaktadır (URL-2, 2021). Dikişsiz profillerin imalatı üç farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemler; ekstrüzyon ile dikişsiz profil imalatı, özel haddeleme ile dikişsiz profil imalatı ve boru çekme ile dikişsiz imalat yöntemi olarak sınıflandırılabilir.

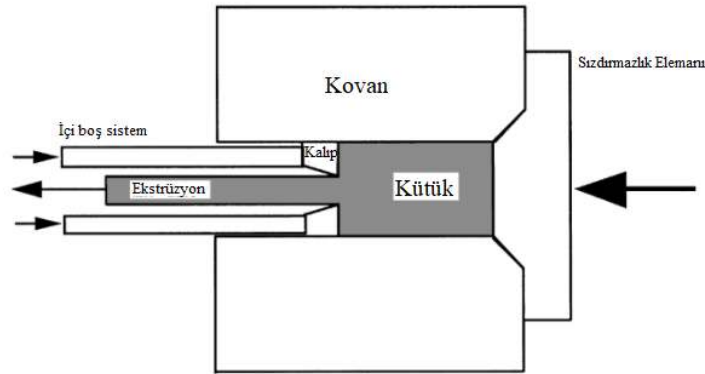
Ekstrüzyon ile dikişsiz profil üretiminde, bir kütüğü (silindirik metal bloğu) ıstampa veya hidrolik pres kullanarak bir kalıp boşluğundan geçmeye zorlanması işlemidir. Kütüğe uygulanan kayma ve basma, kütük malzemesinin akma gerilmesine ulaşmak için gerilmenin yükselmesine neden olur ve kalıp boyunca plastik deformasyon gerçekleşir. Böylece kütüğün istenilen şekli alması sağlanmaktadır (Qamar vd., 2003; Qamar, 2010). Ekstrüzyon imalat yöntemi direkt ekstrüzyon, hidrolik ekstrüzyon, indirekt ekstrüzyon ve darbeli ekstrüzyon olarak dört grupta incilenebilmektedir (Qamar vd., 2019:1). Direkt ekstrüzyon yönteminde ıstampa hareket yönü ve metal akma yönü aynıdır. Kütük ve kovan arasındaki nispi hareket nedeniyle, bir sürtünme faktörü söz konusudur. Bu sürtünme, bir sıvının kovan ve kütük arasında bir arayüz görevi gördüğü hidrostatik ekstrüzyon kullanılarak önlenabilir. Bu arayüz görevi gören sıkıştırılamaz akışkan hidrolik ekstrüzyonun direkt ekstrüzyondan tek farkıdır. Kütük ve kovan temas etmediği için sürtünme faktörü ortadan kalkar. Ancak bu yöntem zor bir mekanik kurulum gerektirir. Şekil 2.3.’de direkt ekstrüzyon prosesi görülmektedir.



Şekil 2.3. Direkt Ekstrüzyon Prosesi

Kaynak: (Saha, 2000)

İndirekt ekstrüzyonda, ıstampa hareketinin yönü ve metal akışının yönü birbirine zıttır ve kütüğün göreceli yer değiştirmesi yoktur (sürtünme yok). Darbeli ekstrüzyon, bir tür dolaylı işlemdir, ancak kademeli olarak artan bir darbe yerine (bir zımba yoluyla) bir darbe yükü kullanılır (Bauser, vd., 2006; Qamar vd., 2019). Şekil 2.4.'de indirekt ekstrüzyon prosesi görülmektedir.



Şekil 2.4. İndirekt Ekstrüzyon Prosesi

Kaynak: (Saha, 2000)

Ekstrüzyonun başka bir sınıflandırması, çalışma sıcaklığına dayanmaktadır. Soğuk ekstrüzyon, oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve sıcak ekstrüzyona kıyasla (daha yüksek sıcaklıklarda) daha iyi boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi sağlar. Bununla birlikte, soğuk işlem daha yüksek basınçlar gerektirir ve ekstrüde edilebilirliği azaltır ve bu kombinasyon belirli ürün kusurlarına yol açabilir. Daha yüksek ekstrüde edilebilirlik ve genel kullanım kolaylığı nedeniyle, ticari ekstrüzyon genellikle doğrudan sıcak ekstrüzyondur (Nieto, 2010).

Dikişsiz profil üretiminin ikinci yöntemi olan özel haddeleme ile profil imalatında, metal kütük sıcak işlemle delinmektedir. Başka bir deyişle, metal kütük eksenleri birbirine göre az eğik olan ve aynı yönde dönen iki merdane ve delme işlemini gerçekleştiren bir zımba ile kalın et kalınlığında boru haline getirilir. Delinme işlemi sonrasında profillerden hadde merdanelerinin çapları değiştirilerek istenilen et kalınlığı ve çap elde edilmektedir. Bu aşamada profil et kalınlığı ve çapı azalma gösterdiğinden profil boyunda bir miktar uzama meydana gelmektedir. İstenilen boya göre profillerde kısaltma işlemi yapılabilmektedir (Anık, 2019).

Dikişsiz profil üretiminin son yöntemi olan boru çekme ile profil üretimi, genellikle dikişsiz profil imalat yöntemlerinden olan özel haddeleme ve ekstrüzyon ile üretilen profillere uygulanır. Boru çekme işlemi soğuk işlem olarak gerçekleştirilmektedir. Soğuk işlem, boru çekme ile üretilen profillerden yüksek yüzey kalitesi, daha iyi mekanik özellikler ve boyut toleranslarında hassasiyet elde edilmesini sağlamaktadır. Soğuk işlemin bir diğer avantajı ise çekme ile sıcak şekillendirmeye elde edilmesi olanaksız olan küçük çap veya ince et kalınlığına sahip istenilen kesitli profillerin imal edilebilmesidir (Anık, 2019). Boru çekme ile dikişsiz profil yönteminin başlıca üç çeşidi mevcuttur. Bunlar; içi boş çekme, malafa ile çekme veya zımba ile itmedir.

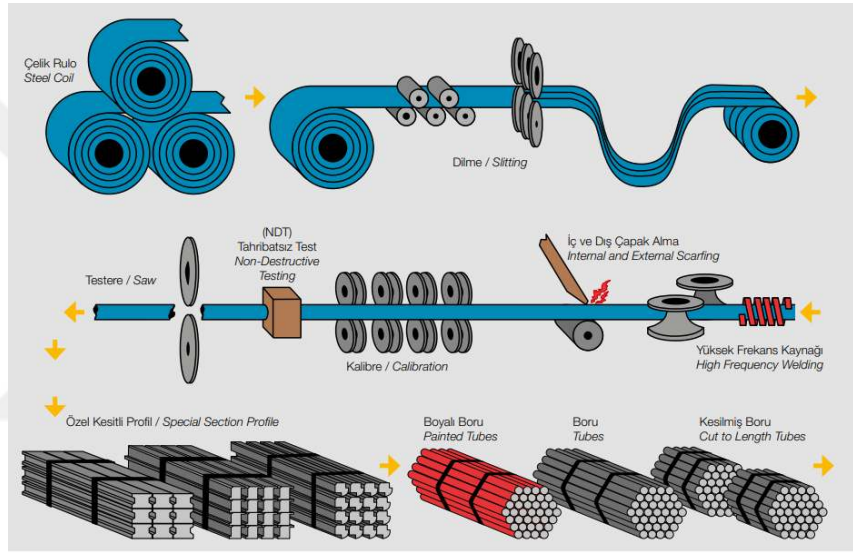
İçi boş çekme imalat yönteminde meydana gelen deformasyon diğer boru çekme yöntemlerine göre daha azdır (Yavuz, 2007: 42). Ayrıca içi boş çekme yönteminde profilin iç kısmını kontrol eden bir eleman bulunmadığından, çekilen profilin et kalınlığı ve iç yüzeyi homojen olmayabilir. Bu nedenlerle içi boş çekme yöntemi çoğunlukla küçük profil imalinde kullanılmaktadır.

Sabit malafa ile çekmede profilin iç çapı matrisin ortasına yerleştirilen sabit malafa ile kontrol edilir böylece et kalınlığı azaltılır. Malafa kesiti silindirik veya konik olabilir. Malafa ile boru çekmede içi boş çekmeye nazaran daha hassas boyutlarda profillerin imalatı mümkündür. Boru malafa ara yüzeyindeki artan sürtünme sebebiyle kesit daralması genellikle %30' dan azdır. Boru çekme işleminde malafa, çekme matrisi içersinde yüzen biçimde de olabilir. Yüzen malafa ile %45' e kadar kesit daralması sağlanabilir ve aynı değerdeki kesit daralması için sabit malafa ile çekmeye oranla yüzen malafa ile çekmede daha az çekme kuvveti gerekir (Yavuz, 2007: 42). Genellikle küçük çaplı profillerin çekiminde tercih edilen yüzen malafa ile çekme işlemi ile kangal halinde sarılabilecek çok uzun boyda profiller üretilabilmektedir. Boru çekme işleminde malafadan meydana gelen sürtünmenin neden olduğu problemler zımba ile çekmede en az olmaktadır. Çekme işlemi uzun bir çubuk üzerinde yapılır.

Zimba çapı boru iç çapını belirler, çekme sırasında borunun et kalınlığı ve dış çapı azalır. Çekme işleminden sonra zımbanın çekilen boru içinden çıkarılması gerekir. Zımbanın dışarı çıkarılması sırasında profilin boyut toleransları çok az artabilir (Anık, 2019).

2.1.2. Dikişli İmalat

Dikişli profil imalatı; profil üretim sırasında kaynak yöntemi kullanılan imalat şeklidir. Dikişli imalat kullanılan kaynak yöntemine ve kaynak yönüne göre sınıflandırılabilir. Kaynak yöntemine göre alın kaynağı ve elektrik kaynağı yöntemleri olarak, kaynak yönüne göre boyuna kaynaklı ve spiral kaynaklı olarak sınıflandırılır. Sanayi boru ve profilleri yüksek frekans kaynağı ile üretilmektedir. Profil üretiminin genel şeması Şekil 2.5.'de görülmektedir.



Şekil 2.5. Profil Üretim Şeması

Kaynak: (URL-3, 2021)

Daire, kare ve dikdörtgen kutu profillerin yüksek frekans kaynak tekniği kullanılarak seri imalatında yedi farklı üretim aşaması yer almaktadır: Hammadde girişi ve dilme hattı, besleyici ve akümülayon, şekillendirme, kaynak, soğutma, kalibrasyon ve son işlemdir (Orhan, 2008: 9).

Hammadde girişi ve dilme hattı bölümünde, profil üretiminde kullanılacak olan çelik sac, rulo halinde üretici firmaya teslim edilir. Sac rulonun kalınlık, genişlik ve kalite gibi bilgileri dilme işlemi yapılacak bölüme gönderilir. Dilinecek olan sac rulo, dilme hattına getirilir. Daha sonra dilinme işleminin gerçekleştirilmesi için rulonun uç kısmı açılır, doğrultma merdanesi yardımıyla uç kısmı düzleştirilir ve dilme işleminin yapılacağı hatta getirilir. Bu kısımda dilme işlemini yapacak bıçaklar alt ve üst millere dizilir ve önceden belirlenen ölçülere göre dilme işlemine başlanır. Sac rulo kenarlarında dilinen bantların istenilen toleranslı olması

adına dilme çapağı olarak adlandırılan atık sac payı bırakılır ve bu atık apak sarıcıya sarılır. Daha sonra seperatör (ayırıcı) ile bant sarıcıya sarılır. İşlem bitiminde bantlar vinç aracılığıyla bant sahasına alınır. Böylece sac rulo yuvarlak, kare ve dikdörtgen kutu profil üretimi için hazır hale gelmiştir.

Besleyici ve akümüasyon bölümünde, dilinmiş sac bant, vinç aracılığıyla alınır ve besleme hattına getirilir. Çevresinde döneabilen besleyici, sac bandı akümüasyon hattına iletir. Akümüasyon hattında olan hareketli merdaneler aracılığıyla, besleyiciden gelen bant akümüasyon içerisine sarılır. Sarımı biten sac bandın uç kısmı ile besleyiciden gelen bandın ucu kaynak yöntemleriyle birleştirilir ve akümüasyona bandın sarılması işlemi devam eder.

Şekillendirme bölümünde, şekillendirme işlemi değişik boyutlardaki form kalıpları ile gerçekleştirilir. Şekillendirme işlemi iki kademede yapılmaktadır. Birinci kademe şekillendirme, geniş açılı kalıplarda yapılır. Bunun nedeni hem akümüasyondan dikkatlice bandı çekmek hem de sacın ilk şekillendirmesini yapmaktır. Saca kalıplar yardımıyla plastik şekil verme işlemi yapılır. Bu işlem iki çeşit merdane grubu ile gerçekleştirilir. Ana merdane grupları alttan ve üstten baskı uygularken, ara merdane grupları yanlardan baskı uygular. Böylece düz sac kademeler halinde dairesel şekil alır. İkinci kademe şekillendirme, saca profil formunu vermek, kaynak edilecek bant uçlarının karşı karşıya getirilmesi amacıyla gittikçe daralan radyüs açılı olan merdaneler grubu ile gerçekleştirilir. Daralan radyüs açılı merdaneler saca son şekil verme işlemini gerçekleştirir. Son şekil verme işleminde uçların birleşme noktasına baskı uygulanarak kaynak bölgesine kaynak ağızı açma görevini gerçekleştirirler. İşlemin amacı mukavemetli bir malzeme üretmektir.

Kaynak bölümünde, kılavuz merdaneleri aracılığı ile sac, kaynak işlemine uygun hale getirilir. Üst merdanede bulunan ara bıçak kaynak işlemi uygulanacak uçların paralelliğini sağlar. Böylece sac, kaynaksız boru haline gelmiş olur. Daha sonra yüksek frekans kaynağı ile kaynak yapılır. İkili veya üçlü kaynak röleleri kullanılır. Kaynak rölelerinin şekillendirilmiş sacın iki yüzeyini doğru bir biçimde birleştirilecek şekilde ayarlanmış olmasına dikkat edilmelidir. Kaynak işleminden sonra borunun iki kademede çapakları temizlenir. İlkinde kaba bir temizleme ikincisinde hassas bir temizleme yapılır.

Soğutma bölümünde, kaynak işleminde, kaynak bölgesinden boru yüzeyine ısı transferi gerçekleşmektedir. Kaynak edilen bölge etrafında meneviş rengi meydana gelmektedir. Bu da borunun görünümünü olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple ısı transferini engellemek

adına soğutma yöntemi kullanılmaktadır. Soğutma sıvısı yardımıyla işlem gerçekleştirilmektedir.

Kalibrasyon bölümünde, üretim sırasında istenilen toleransların elde edilmesi amacıyla yapılan işlemdir. Profile dik ve yan merdaneler vasıtası ile nihai ölçüler verilir.

Bir sonraki adım da, boruya profil formunu verme ve boruyu doğrultma işlemi makaralar (merdane) yardımı ile gerçekleştirilir. Daha sonra istenilen boyutlarda testere yardımı ile profiller kesilir. İstenilen kalitenin sağlanması amacıyla son çapak alma işlemi gerçekleştirilir. Son olarak üretilen profillerin kalite kontrol işlemleri yapılır ve paketleme gerçekleştirilir.

Endüstride; normal basınçta çalışmalarda dikişli borular yeterli olmakta ve kullanılmaktadır. Fakat gelişen teknoloji ve buna bağlı olarak daha yüksek basınçta çalışma durumlarında dikişli borular yetersiz kalmaktadır. Çünkü yüksek basınç altında dikişli borular kaynak dikişlerinden çatlayıp kırılmakta ve dolayısıyla mal ve can kaybına neden olmaktadır. Aynı zamanda işçilik ve zaman kayıpları da meydana gelmektedir. Bu nedenle gelişen teknoloji ile birlikte daha kalın cidarlı, büyük çapta, eksiz, uzun dikişsiz profil imali mümkün olmuştur.

2.2. Dikişli ve Dikişsiz Boru Üretimlerinin Karşılaştırılması

Dikişli ve dikişsiz boruların genel bir değerlendirilmesi yapıldığında; dikişsiz borular ince cidar kalınlıklarında, küçük çapta ve uzun boylarda imal edilebilirler. Dikişsiz boruların herhangi bir kaynak dikişi olmadığından boru da kopma veya zayıflama gibi bir hasar söz konusu değildir. Fakat üretimi gereği dikişsiz borular dikişli borulara nazaran daha maliyetlidir. Bu sebeple az miktarda üretim de ekonomik değildir. Son olarak dikişsiz boruların imalatı için gereken güç, dikişli boruların imalatı için gereken güçten daha fazladır.

Dikişli borularda ise; kaynak dikişleri zamana paralel olarak zayıflamakta ve dikişlerde kopma meydana gelmektedir. Dikişsiz borulara nazaran üretim maliyeti daha düşüktür. Aynı zamanda imalat süresi, kullanılan teçhizat ve iş gücü açısından dikişsiz borulardan çok daha avantajlıdır (URL-2, 2021). Aşağıda Şekil 2.6.'da dikişli ve Şekil 2.7.'de dikişsiz boru örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.6. Dikişli Boru Profil

Kaynak:(URL-4, 2021; Malzeme Bilimi,2021)



Şekil 2.7. Dikişsiz Boru Profil

Kaynak: (URL-5, 2021)

2.3. Kapalı Profillerin Kullanım Alanları

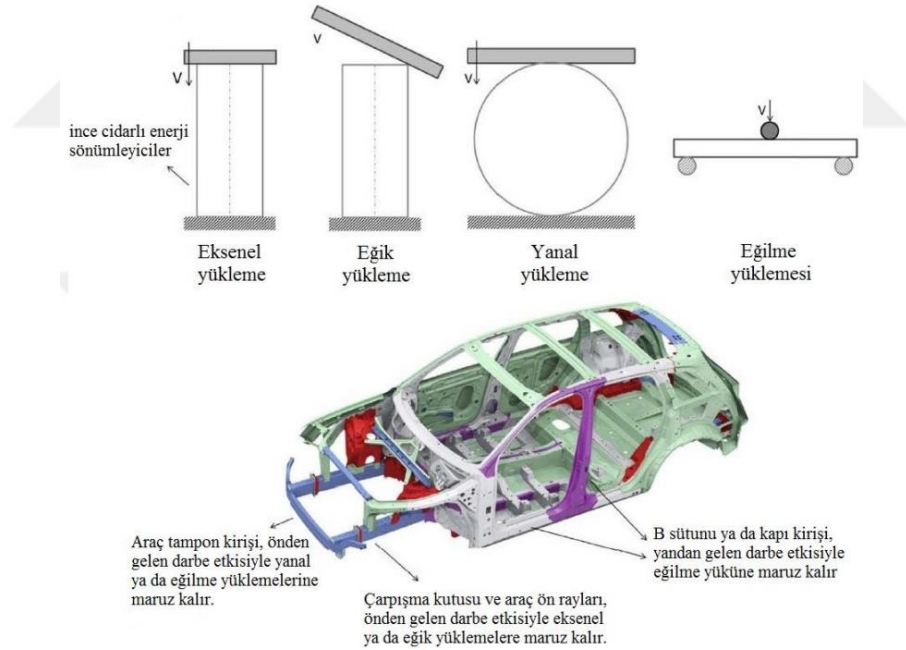
Kapalı profiller, sahip oldukları avantajlar neticesinde günümüzün birçok endüstriyel sektöründe kullanılmaktadır (Sezan, 2010:1). Bu endüstriyel sektörlerden taşımacılık sektöründe; otomobil, otobüs, tren, römork, metro, vinç ve gemi imalatında kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe; binaların dış cepheleri, görsel sütunlar oluşturma, çelik konstrüksiyonlar, çatı kaplama gibi destek yapıları, korkuluklar, konut yapıların imalatı ve köprü imalatında kapalı kesitli profillere ihtiyaç duyulmaktadır. Genel imalat sektöründe; mobilya sektörü, beyaz eşya sektörü ve yan sanayi sektörleri kapalı kesitli profilleri kullanılmaktadır. Makine imalat sektöründe ise; tarım makineleri, konveyör/çelik bant imalatında, genel makine imalatı ve makine iskeletleri imalatı, doğalgaz sektörü, gaz sanayi, hidrolik sektörü ve ısı sektörü kapalı kesitli profillerin yaygın kullanım alanı olan sektörlerdir.

2.4. Kapalı Profillerin Mekanik Yük Altında Davranışları

Kapalı kesitli profillerin kullanım amacı, yapısal anlamda kritik bölgelerde yüksek dayanım sağlarken çarpışma ve darbe koşullarında da yüksek enerji absorbe etme kabiliyeti sergileyebilmesidir. Aynı zamanda korozyon/yangın gibi faktörlere gösterdikleri direnç, hafiflik, kolay ulaşılabilirlik gibi diğer etmenler de yaygın kullanımının nedenlerini oluşturmaktadır. Önceki bölümlerde anlatılanlar ışığında, kapalı profillerin sahip oldukları bu üstün yetenekleri nedeni ile daha çok yapısal dayanım alanlarında ve çarpışma kritik parçalarda tercih edildiği gözlemlenmiştir. Kapalı profillerin yaygın kullanım alanı olan taşıyıcı konstrüksiyonlarda maruz kaldıkları yükleme tipleri bası ve eğilme temelli bir yüklemedir. Başka bir deyişle taşıyıcı yapılarda çok çeşitli (dinamik) yüklemelere maruz kalmamaktadırlar. Fakat otomotiv sektöründe çarpışma kritik parçalarda kullanımlarında, otomobiller dinamik bir yapı olduklarından burada daha farklı tipte mekanik yüklemelere maruz kalabilmektedirler. Bu sebeple, ince cidarlı elemanların servis koşullarında hangi tür mekanik yükleme koşullarına maruz kalacaklarının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Çünkü ince cidarlı elemanların dayanım kabiliyeti, maruz kaldıkları mekanik yükleme türleri ve koşullarında büyük oranda farklılıklar yaratmaktadır. Ayrıca ince cidarlı elemanların kesit geometrisi de, maruz kaldıkları yükleme koşullarına dayanımlarında farklılıklar yaratmaktadır. Tüm bu hususların anlaşılması ve çalışılması mühendislik adına büyük önem taşımaktadır.

İnce cidarlı elemanlar, darbe sırasında eksenel, eğik, yanal ve eğilme gibi birçok farklı yükleme durumlarına maruz kalabilmektedir. Bu çeşitli yükleme durumları, ince cidarlı elemanlar da darbe sırasında bir ya da daha fazla deformasyon mekanizması sergilenmesine neden olmaktadır. İnce cidarlı elemanların en çok maruz kaldıkları yükleme tipi eksenel yükleme tipidir (Çetin, 2020: 23). Kutu kesitli profiller sahip oldukları kesit geometrisi sayesinde eksenel yükleme tiplerinde yüksek performans sergilemektedirler (Fenkli vd., 2015: 35). İnce cidarlı elemanların eksenel ezilmesi, sabit bir yük altında gerçekleşmektedir. Eksenel yükleme altındaki elemanlar yanal yükleme altındaki elemanlara nazaran daha fazla özgül enerji absorbe etme kabiliyeti göstermektedirler (Alghamdi, 2001: 190). Çünkü eksenel yükleme altındaki ince cidarlı elemanın önemli bir kısmı enerji absorbe etme işlemine katılmaktadır. Kare, daire, üçgen veya çokgen geometrili ince cidarlı elemanlar eksenel olarak yüklenebilirler (Çetin, 2020: 23). İnce cidarlı elemanların maruz kaldıkları bir başka yükleme tipi eğilme yüklemesidir.

İnce cidarlı elemanların yanal yüklere maruz kalmaları, elemanlarda eğilme yükleme tipinin meydana gelmesine neden olmaktadır (Günay, 2013: 24). İnce cidarlı elemanlarda eğilme dayanımı; yüklemenin şekline, boyutuna ve konumuna göre önemli ölçüde değişmektedir. Bu nedenle elemanların eğilme deplasmanının incelenmesi eksenel yükleme tipine göre çok daha karmaşık bir yapıdır. Eğilme deplasmanı veya ince cidarlı elemanların yanal çökmesi Şekil 2.8.'de gösterildiği gibi elemanın dikey eksenine dik bir noktadan yük uygulanmasını içermektedir. Eğilme altında ince cidarlı elemanın deformasyonu, yükleme konumunda bölgesel bir çökme ile başlamaktadır. Daha sonra yükleme konumunda enine kesitte meydana gelen azalma sebebi ile ince cidarlı elemanda global eğilme meydana gelmektedir. İnce cidarlı elemanın enine kesit şekli, eğilme yükü altında enerji absorbe etme karakteristliğini etkilemektedir. Dolayısıyla kare, daire ve dikdörtgen gibi farklı kesitli kapalı profillerin/ince cidarlı elemanların eğilme yükü altında davranışları da farklılıklar sergileyecektir (Baroutaji vd., 2017: 139). İnce cidarlı elemanların enerji absorbe etme karakteristliğinden ötürü yaygın kullanıldıkları otomobillerde maruz kaldıkları yükleme tipleri Şekil 2.8.'de görülmektedir.



Şekil 2.8. Otomobil de kullanılan ince cidarlı elemanlar da görülen en yaygın yükleme/deformasyon çeşitleri

Kaynak: (Baroutaji vd., 2017: 139)

Örneğin otomobilde önden çarpışma senaryosunda, çarpma kutularını içeren ön raylar eksenel deformasyon moduna girer ve çarpma kutusu toplam emilen enerjinin yaklaşık %15'ini oluşturur. Aynı zamanda çarpma kutusu toplam kinetik enerjinin de yaklaşık %50'sini absorbe etmektedir (Witteman, 1999: 23).

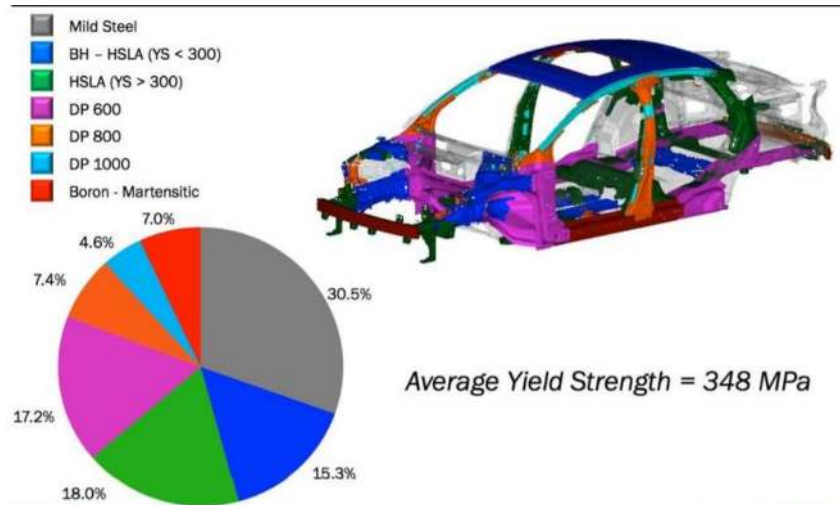
Öte yandan tampon çapraz kirişi bir eğilme veya yanal deformasyon moduna girmektedir ve toplam enerjinin %25'ini absorbe etmektedir (Wagström, 2005: 372). Burada ana kinetik enerji, ön panel, çamurluklar, tekerlek yuvaları ve kaput gibi aracın diğer ön yapısal bileşenleri tarafından emilir. Şekil 2.8.'de de görüldüğü üzere ince cidarlı elemanlarda meydana gelen eğilme deplasmanı deformasyonu üç-nokta eğme şeklinde gerçekleşmektedir. Bu sebeple ince cidarlı elemanların eğilme deformasyonunun tespiti için üç-nokta eğme testleri gerçekleştirilmektedir.

2.5. Kapalı Profil İmalatında Kullanılan Malzemeler

Kapalı profiller, taşıyıcı yapılarda ve çarpışma kritik parçalarda yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Hem taşıyıcı yapılarda hem de çarpışma kritik parçalarda kapalı profillerden yüksek mukavemet sergilemeleri beklenmektedir. Bu beklentiyi karşılamak adına metalik malzemeler içerisinde genellikle çelik sınıfı tercih edilmektedir. Fakat profillerden, taşıyıcı yapıların yer almadığı (korkuluklar, pencere pervazları vb.) kullanım alanlarında yüksek mukavemet sergilemeleri beklenmemektedir. Bu sebeple kapalı profiller kendilerinden yüksek mukavemet beklenmeyen alanlarda genelde alüminyumdan imal edilseler de yaygın olarak kullanıldıkları makine sektörünün taşıyıcı yapı ve çarpışma kritik parçalarında kullanılması bu malzemelerin hemen hemen tamamının çelik malzemeden imal edilmesine yol açmaktadır.

Çelik, %2'den daha az oranda karbon barındıran, mekanik ısı işlemler sonucu çeşitli özellikler kazanabilen, temel bileşeni demir (Fe) ve temel alaşımı karbon (C) olan bir alaşımdır. Çeliğin içerisindeki karbon elementinin miktarı arttıkça mukavemeti ve sertliği de artmaktadır. Çelik, demire nazaran daha sert ve hafif olduğundan iyi işlenebilme özelliğine sahiptir. Yapılarda tercih edilen çelikler ise sıcak işlenmiş çeliktir. Çelikte karbon elementinden başka fosfor, azot, silisyum, manganez, bakır gibi elementler içermektedir. Bu elementlerin çeliğin içinde belirli oranları aşmaması gerekmektedir. Aynı zamanda çelik alaşımına krom, nikel, vanadyum, molibden gibi elementler ilave edilerek yüksek kaliteli çelikler elde edilebilmektedir (Atasaral, 2009: 4). Hammadde kaynaklarının bol ve düşük maliyetli olması, aşına olunan ve yaygın imalat teknolojileri ile az maliyeti diğer metal ve alaşımlarına nazaran en önemli avantajlarını sağlamaktadır. Aynı zamanda çeliğin geri dönüştürülebilmesi, kaynak kabiliyetinin gelişmiş olması da bir diğer avantajlarıdır. Çeliklerin yüksek mukavemet sergilemeleri, darbe sönmüleme özelliklerinin gelişmiş olması ve yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinden ötürü yaygın olarak otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Bir otomobilde her komponentin farklı bir görevi olduğundan, bu komponentler farklı malzemelerden

üretilmektedirler. Otomobil dış gövde komponentlerinin dayanımı yolcu güvenliği açısından büyük önem teşkil etmektedir. Dış gövde komponentlerinin dayanımı, parçaların kalınlığı, kullanılan malzeme ve geometrik konfigirasyonunun ayarlanmasıyla sağlanabilir. Aynı zamanda bu komponentlerden düşük ya da yüksek şiddette darbelere dayanıklı olması beklenir. Darbe direncinin iyileştirilmesi amacıyla akma mukavemetini arttırmak bir çözüm olsa dahi, presleme proseslerinde yüzey bozulmalarına karşı yüksek yüzey kalitesinin sağlanabilmesi için akma mukavemetinin 240 MPa'ın altında tutulması gerekmektedir (Takahashi, 2003). Bu gereksinimleri karşılamak için, üretim sırasında düşük akma dayanımına sahip, işletme koşullarında ise yüksek akma dayanımı gösteren fırınlama ile sertleştirilebilir (BH - Bake Hardening) çelikler kullanılmaktadır. Otomobilin; arka süspansiyon braketleri, çamurluk kirişi, arka çerçeve rayı takviyeleri, tampon kirişleri, şasi bileşenleri, çerçeve rayları ve B-sütunu takviyeleri karmaşık fazlı (CP - Complex Phase) çeliklerden imal edilmektedir (WorldAutoSteel, 2021). Çift fazlı çelikler (DP - Dual Phase) ise tekerlek jantı, enerji yutucular (crashbox), koltuk çerçevesi, tampon, kapı panelleri, şasi, jant kapakları, kayış kasnakları gibi elemanlarda kullanılmaktadır (Karaçalı, 2015: 2). Otomobil yan kapı kirişleri, tampon kirişleri, tampon takviyeleri gibi komponentlerde ise martensitik (MS- Martensitic Steel) çelikler kullanılmaktadır. Gösterge paneli, çarpma kutusu, motor kızıağı, ön ve arka raylar, koltuk çerçevesi ise dönüşüm etkili plastisite çelikleri (TRIP - Transformation-Induced Plasticity) ile üretilmektedir. Kapı darbe kirişleri, tekerlek yuvası, tekerlek, tekerlek jantı, alt kontrol kolu, A-sütunu ikizlenme etkili plastisite (TWIP - Twinning-Induced Plasticity) çelikler ile üretilmektedir. Şekil 2.9.'da otomotiv sektöründe kullanılan çelik malzemeler, örnek bir araç üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Otomotiv sektöründe kullanılan çelik malzemeler

Kaynak: (WorldAutoSteel, 2021)

Otomobil endüstrisinin yanı sıra çeliklerin yaygın olarak kullanıldıkları bir diğer sektör taşıyıcı konstrüksiyon yapılarıdır. Hem otomotiv endüstrisi hem de taşıyıcı konstrüksiyonlarda yüksek mukavemet beklentisinin yanı sıra otomobillerde çarpışma direncini absorbe edebilme, taşıyıcı konstrüksiyonlarda ise deprem enerjisini absorbe edebilme kabiliyetlerinin her birini bünyesinde barındıran yapı çelikleri öne çıkmaktadır (Dökmeci ve Apay, 2017: 1376). Bu çelikler genellikle alaşımsız çelik olarak tanımlanmaktadır. Yapı çeliklerinin mekanik özellikleri karbon miktarına bağlıdır. Yapı çelikleri homojen ve izotrop malzemelerdir. Üretimleri daimi denetim altında gerçekleştirildiklerinden güvenlidirler. Yüksek mukavemet sergileyen malzemeler olan yapı çeliklerinin öz ağırlığının taşıdığı yüke oranı düşüktür. Aynı zamanda çeliğin diğer yapısal alanlarda kullanılan malzemelere nazaran elastisite modülü oldukça yüksektir. Bu özelliği ile yapı çelikleri stabilite problemlerinde, dinamik yüklerde ve titreşimlerde kendinden beklenen dayanımı verebilmektedir. Yapısal malzemelere nazaran (betonarme ve ahşap gibi) şekil alabilme kabiliyeti oldukça yüksektir. Çeliğin sünek olması, enerjiyi absorbe edebilme kabiliyeti üzerinde de önemli bir rol oynamaktadır. Böylece yapısal alanlarda deprem enerjisini yutabilirken, otomotiv endüstrisi gibi çarpışma kritik alanlarda da çarpışma direncini absorbe edebilmektedir (Atasaral, 2009: 5). Genel yapı çelikleri kalite gruplarına göre sınıflandırılabilmektedir (URL-6, 2021). Birinci kalite genel yapı çelikleri sınıfında yalnızca St33 çeliği yer almaktadır. St33 çeliğinin dayanımı diğer kalitelere nazaran daha düşüktür. İkinci kalite genel yapı çeliği grubundaki çelikler, en fazla %0,050 P ve %0,050 S içerirler ve daha çok kaynak konstrüksiyonlarında tercih edilirler. Yüksek mukavemet sergileyen ikinci kalite yapı çelikleri St37, St44, St52 çelikleri olarak bu sınıfta yer alırlar. Üçüncü kalite çelikler ise yaşlanmaya dayanıklı ve ince taneli yapıları vardır. Ayrıca yapı çelikleri içerisinde mukavemeti en yüksek yapı çelikleridir. St60, St70 çelikleri örnek verilebilmektedir.

Yapı çelikleri ve mekanik özellikleri Tablo 2.1.'de ve yapı çelikleri ve kullanım yerleri Tablo 2.2.'de görülmektedir. Tablo 2.2.'de görüldüğü gibi kapalı profillerin imalatında; 2. kalite yapı çelikleri sınıfında olan St37, St44 ve St52 çelikleri kullanılmaktadır.

Tablo 2.1. Yapı çelikleri ve mekanik özellikleri

DIN (Eski)	DIN (Yeni)	SAE/AISI	ÇEKME DAYANIMI(MPa)		AKMA SINIRI ($\geq$ MPa)					KOPMA UZAMASI (Şekillendirme yönü- dik doğrultu) ($\geq$ %)		
			< 3 mm	$\geq$ 3 mm	$\leq$ 16 mm	$\geq$ 16 mm	$\geq$ 40 mm	$\geq$ 63 mm	$\geq$ 80 mm	$\leq$ 3 mm	$\leq$ 40 mm	$\leq$ 63 mm
				$\leq$ 100 mm		$\leq$ 40 mm	$\leq$ 63 mm	$\leq$ 80 mm	$\leq$ 100 mm	$\geq$ 40 mm	$\geq$ 63 mm	$\geq$ 100 mm
St33	S185	-	310-540	290-510	185	175	-	-	-	16	-	-
St37	S235	-	360-510	340-470	235	225	-	-	-	26	25	24
St44	S275	A570Gr.40	430-580	410-560	275	265	255	245	235	22	21	20
St52	S355	-	510-680	490-630	355	345	335	325	315	22	21	20
St60	E335	-	590-770	570-710	335	325	315	305	295	16	15	14
St70	E360	-	690-900	670-830	360	355	345	335	325	11	10	9

Kaynak: (URL-6, 2021)

Tablo 2.2. Yapı çelikleri ve kullanım yerleri

DIN (Eski)	DIN (Yeni)	SAE/AISI	KULLANIM YERLERİ
St33	S185	-	-
St37	S235	-	İnşaat, sanayi sektöründe, kutu profil, çubuk yapımı ve sıcak haddelenmiş sanayi profilleri yapımında
St44	S275	A570Gr.40	İnşaat, sanayi sektöründe, yüksek mukavemetli sıcak çekilmiş sanayi profilleri yapımında
St52	S355	-	Sanayi ve inşaat sektöründe yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda
St60	E335	-	Yüksek mukavemet gerektiren makine elemanları, dişli çarklar vb. uygulamalarda
St70	E360	-	Perçin, özel cıvata kama ve mukavemet gerektiren makine elemanlarında

Kaynak: (URL-6, 2021)

St37 çeliği kaynak edilebilirliğinin iyi olması, ince taneli bir dokuya sahip olması, istenilen şekilde (kaynar, sakın dökülmüş veya yarı sakın dökülmüş olarak) dökülebilmesi nedeni ile daha yaygın bir kullanıma sahiptir (URL-6, 2021). St37 çeliğinden imal edilen kapalı profiller birçok farklı mühendislik uygulamasında yaygın kullanım alanı oluşturmaktadır. St37 kutu ve boru profiller; Otomotiv ve otomotiv yan sanayi, beyaz eşya, bisiklet, mobilya ve çelik eşya, tekstil, elektrikli ev aletleri vb. alanlarda kullanılmaktadır (URL-7, 2021).

2.6. Bölüm Değerlendirmesi

Tezin bu bölümünde, kapalı kesitli profillerin neler olduğu, nasıl imal edildikleri, imalat aşamaları, hangi sektörlerde kullanıldıkları, maruz kaldıkları mekanik yükleme tipleri, hangi tür malzeme ile imal edildikleri ve sahip oldukları avantajlara değinilmiştir. Sonuç olarak, tezin 2. bölümünde anlatılanlar ışığında, St37 yapısal çelik malzemesinden üretilen kapalı kesitli profillerin daha çok yapısal dayanım alanlarında kullanıldığı çıkarımı yapılabilmektedir. Öyle ki yapısal dayanımı arttırmak ve enerji absorbe kabiliyetinin geliştirilmesi adına kullanılan bu ince cidarlı elemanların eğilme yüküne maruz kaldıkları da görülmüştür. Maruz kaldıkları eğilme yükleme tipi, yapı gereği üç-nokta eğme şeklinde bir davranış sergilemektedir. Bu

sebeple kapalı profillerin geliştirilmesi ve servis koşullarında mekanik yüklemelere karşı sergileyecekleri davranışların önceden tahmini, tespiti ve telafisi son derece önem arz etmektedir. Bu amaçla malzemelerin analitik ve deneysel analizlerinin yanı sıra nümerik analizleri de gündeme gelmektedir. Bu sebeple de nümerik analizlerin en yaygın yöntemi olan sonlu elemanlar analizleri yaygın kullanıma sahiptir.



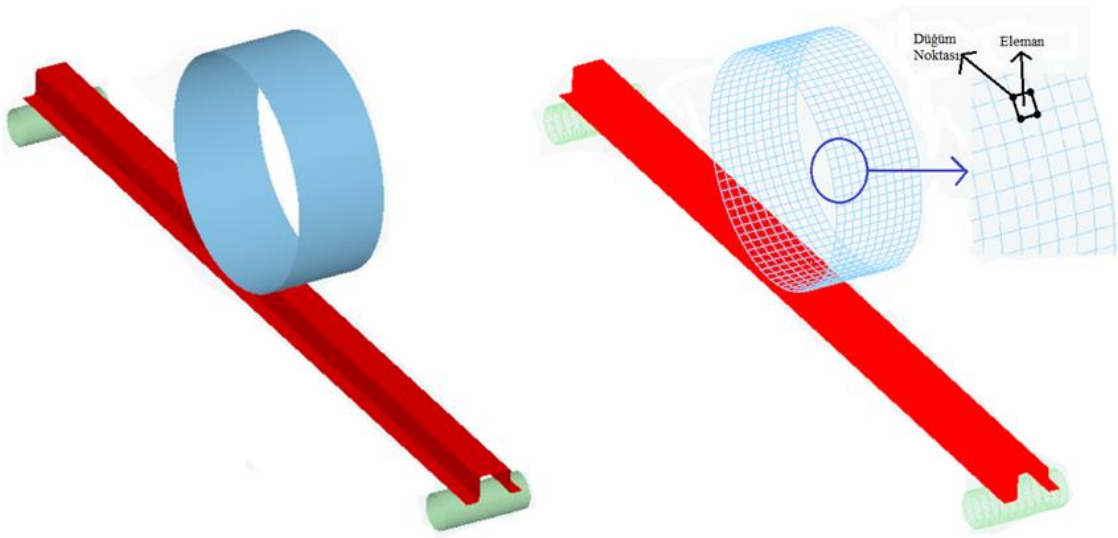
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Mühendislik alanların da karşılaşılan problemler zor ve karmaşık yapıdadırlar. Bu sebeple çeşitli mühendislik disiplinlerin de ortaya çıkan karmaşık problemlerin analitik denklemlerle hesaplanabilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Analitik olarak hesaplanabilmesi mümkün olmayan karmaşık ve zor yapıdaki problemlerin çözümünde genellikle iteratif yöntemler içeren sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Böylece sayısal yöntemler ile çözümü yapılan problemlerden daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu anlamda da günümüzde bazı alanlar da çeşitli mühendislik yöntemleri içerisinde sayısal yöntemler bir adım öne çıkmaktadır. Fakat karmaşık problemlerin sayısal yöntemler ile hesaplanmasında insan gücü/eli ile hızlı bir şekilde çözilememe sorunu endüstriyel anlamda kullanımı zorlaştırmıştır. Bu hız sorunu ise bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile birlikte bilgisayarlarla çözülen denklemler vasıtasıyla ortadan kaldırılmıştır. Bu teknoloji ile birçok sayısal yöntem ortaya çıkarılmaya başlanmıştır. Sonlu zaman, sonlu hacim, sonlu fark ve sonlu elemanlar yöntemi sayısal yöntemlerden bazılarıdır. Bu yöntemler arasında sonlu elemanlar yöntemi gerek uygulanabilirliği gerek karmaşık ve zor problemleri çözme metotları açısından makine mühendisliğin de bir adım öne çıkmaktadır. Aynı zamanda günümüzde bilgisayar teknolojisinin giderek artmakta olan gelişimine paralel olarak da sonlu elemanlar yönteminin kullanımının da bir artış yaşanmıştır.

İlk kez sonlu elemanlar yöntemi, 1956 yılında uçak gövdelerinin analiz edilmesi amacı ile ortaya çıkmıştır. M. J. Turner, vd. (Turner, vd. 1956:1) tarafından yapılan çalışma da, yüksek hızlı uçaklarda görülen aeroelastiklik ve dinamik analiz sorunlarını çözmek adına hesaplamalı metot uygulamaları sunulmuştur. Bu hesaplamalı metot ile yüksek hızlı uçakların maruz kaldığı kuvvet, titreşim, kuyruk ve kanat alanındaki sarsıntıların, eğilmelerin, aeroelastisitenin kontrol ve dengelenmesine olan etkisinin tahmin edilmesi amacı ile yapılmıştır. Daha sonra R. W. Clough (Clough, 1960) tarafından 1960 yılında yayınlanan kitapta sonlu elemanlar ifadesi geçirilmiştir ve böylece literatüre bu ifade kazandırılmıştır. Bu dönemlerde sonlu elemanlar adına literatürde yapılan çalışmaların gerçekleştirilmesi zor bir problemdi. Bunun ana sebebi bilgisayarların işletim gücünün bu hesaplamalar için yetersiz kalması idi. 1970'li yıllardan sonra bilgisayar teknolojisinde elde edilen gelişim ile beraber sonlu elemanlar yöntemi yazılımsal anlamda endüstride kullanılmaya başlandı. Zamanla endüstrinin hem teknoloji hem mühendislik alanlarında son derece ilerleme kat etmesi, buna bağlı olarak rekabet gücünün artmasından dolayı sonlu elemanlar yöntemi adına birçok farklı yazılım geliştirilmiştir. Günümüzde sonlu elemanlar adına yaygın olarak kullanılan Abaqus, Ls-Dyna, Nastran ve

Ansys gibi yazılımlar örnek verilebilmektedir. Tüm sonlu elemanlar analizi yazılımları ortak bir çalışma prensibine bağlı olarak geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi çalışma prensibi; karmaşık problemleri daha basit alt problemlere indirgeyerek, her birinin kendi içerisinde çözülmesi ile tüm çözümün elde edildiği sayısal bir analize dayanmaktadır (Yıldız, 2004). Bu sayısal analiz tekniğinde modelleme, geometrilerin eleman olarak adlandırılan küçük sonlu parçalarına ayrılması yöntemiyle yapılmaktadır. Elemanların birbirlerine bağlandıkları noktalara düğüm noktası ve tüm bu sisteme ise ağ yapısı denilmektedir. Karmaşık yapının basite indirgenmesi ile çözüm elde edildiğinden, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlara yakın olmaktadır. Şekil 3.1.'de örnek bir sonlu elemanlar modeli verilmiştir.

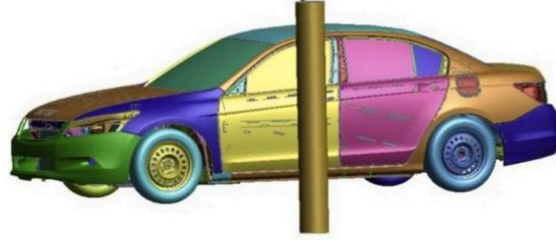


Şekil 3.1. Örnek bir sonlu elemanlar modeli

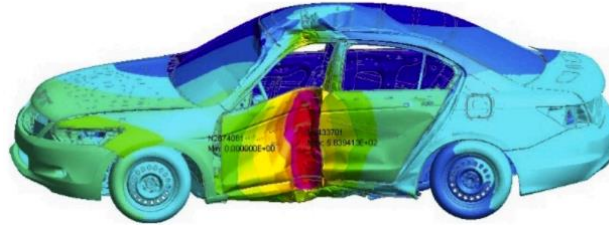
Sonlu elemanlar analizi temelde sanal iş prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Sonlu elemanlar analizin de modellemesi yapılacak olan bir problemin çözümü için oluşturulan sonlu elemanlar denklemleri elemanların düğüm noktalarında meydana gelen yer değiştirmeleri belirlemek için çözülmektedir. Başka bir deyişle, sonlu elemanlar analizlerinde bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarında ki değerlerdir. Bu düğüm noktalarında ki değerlerin hesaplanabilmesi adına bir denklem takımı oluşturulmuştur. Bu denklem takımı, matris formunda ifade edilebilen bir doğrusal cebirsel denklemi içermektedir. Sonlu elemanlar analizinin temel denklemi Denklem (1)'de verilmiştir.

$$[f] = [k][u] \quad (1)$$

[f] bilinen yük vektörünü, [k] sabitler matrisini ve [u] büyüklük alanının düğüm noktasındaki bilinmeyen değerlerini temsil etmektedir. Daha temel bir tanımlama ile f sınır şartlarını (etkiyen yükler vb.), k sistemin yapısını (katı, akışkan, gaz, malzeme özellikleri), u ise aranan düğüm noktaları üzerindeki değerleri (gerilme, deformasyon vb.) temsil etmektedir. Sonlu elemanlar probleminin çözülerek u matrisinin bulunabilmesi için dışarıdan etkiyen sınır koşullarının ve sistemi temsil eden k matrisinin verilmesi gerekmektedir. Bu temele dayanarak sonlu elemanlar yazılımı ile kuvvet hesabı ya da deplasman hesabı gibi çeşitli mühendislik hesaplamaları yapılabilmektedir. Örneğin Şekil 3.2.'de bir aracın yandan çarpma testinin simülasyonu verilmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile yandan darbe sırasında otomobilin çarpışma direncinin ölçümü ve enerjiyi absorbe edebilme kabiliyeti gibi özelliklerinin tespiti gerçekleştirilebilmektedir (More vd. 2020:8).



Otomobilin yan direğe çarpma test simülasyonu



Çarpmadan sonra otomobilde meydana gelen hasar durumunun sonlu elemanlar modeli

Şekil 3.2. Bir çarpışma testine ait sonlu elemanlar analizi

Kaynak: (More vd. 2020:8)

Mühendislik problemlerinin sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmasında temel de iki farklı iteratif yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler, açık zamana bağlı ve kapalı adımlı sonlu elemanlar yöntemleridir. Açık zamana bağlı yöntem, sistemin durumundan hareketle bir sonraki durumu hesaplamaktadır. Her bir çözüm basamağında diğer basamaklardan bağımsız iterasyon yapılmaktadır. Bu yöntem ile birçok sonlu elemanlar çözüm yönteminden çok daha hızlı çözüm elde edilmektedir. Bu sebeple de çözüm basamağı fazla olan, çok eleman içeren, non-lineer problemlerde daha sık tercih edilmektedir.

Kapalı adımlı yöntem de ise, sistemin hem şuan ki hem de hesaplanan sonraki durumu kullanılarak denklemleri çözüp sistemin durumunu hesaplanmaktadır. Kapalı adımlı yöntemde gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar elde etme imkanı vardır. Fakat bu süreçte yakınsama sorunu oluşmaktadır. Karmaşık problemlerin çözümünde çok büyük matrislerin çözülmesi ve bilgisayar hafızasında saklanması problemi yaşanabilmektedir (Şen, 2015).

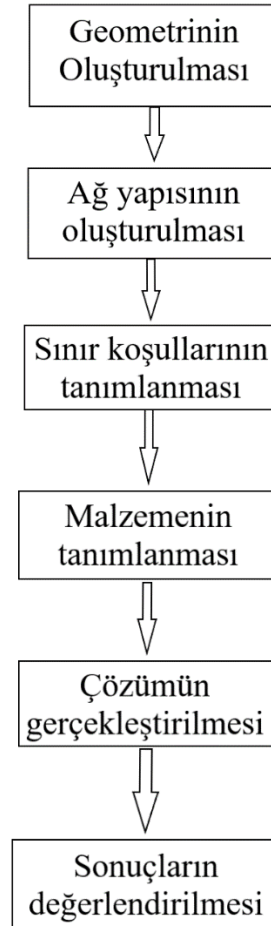
Sonlu elemanlar analizi ile yapılan mühendislik hesaplamalarının doğruluğu, doğrudan tahmin sonuçları ile ilişkilidir. Bu nedenle, yapılan tahminlerin hassas sonuçlar vermesi son derece önem arz etmektedir. Sonlu elemanlar analizi tahmin hassasiyeti ise genel olarak malzeme davranışının modellenmesine ve hesaplama parametrelerine bağlıdır. Bu hesaplama parametreleri; eleman boyutu, eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı ve zaman adımı büyüklüğüdür. Bu parametrelerden eleman boyutu hesaplama parametresi, sonlu elemanlar analizlerinde problemin durumuna göre tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu elemanlar olarak kullanılmaktadır (Çetin, 2007). Örneğin, tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde tek boyutlu elemanlar kullanılırken, iki boyutlu (düzlem) problemlerin çözümünde iki boyutlu elemanlar kullanılmaktadır. İki boyutlu eleman grubunun ana elemanı üç düğüm noktasına sahip olan üçgen elemandır. Bu üçgen elemanın altı düğüm, dokuz düğüm ya da daha fazla düğüm içeren türleri de mevcuttur. Bir başka eleman örneği olarak ise üç boyutlu elemanlar verilebilmektedir. Üç boyutlu elemanlar grubunun ana elemanı üçgen piramittir. Üçgen piramit elemanının yanı sıra altı yüzeyli elemanlar veya dikiörtgenler prizması kullanılmaktadır. Son olarak ise eksenel simetri sergileyen problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılmaktadır. Dönel elemanlar, tek boyutlu ve iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam tur dönmesi ile oluşmaktadır. Bu eleman tipleri sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmakta olup, günümüzde yaygın olarak iki boyutlu ve üç boyutlu elemanlar tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde eleman tipinin yanı sıra eleman boyutu da çok önemlidir.

Sonlu elemanlar hesaplamalarında ağ yapısı oluşturulurken küçük eleman boyutu seçilmesi, çözüm hassasiyetini arttırmaktadır. Böylece ince bir ağ yapısı elde edilmektedir. Fakat eleman boyutlarının küçülmesi, bilgisayar işletim gücünün zorlanmasına ve aynı zamanda çözüm süresinin uzamasına neden olmaktadır. Analizlerde çözüm süresini kısaltmak ve prosesi tanımlamak için çeşitli sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde, malzemenin deformasyonu sırasında düğüm noktalarının hareketlerinin kısıtlanabileceği sınır koşulları mevcuttur. Çözümü yapılan malzeme de simetri varsa simetri koşulu uygulanmaktadır. Simetri sınır koşulu, simetrinin bulunduğu eksen

üzerindeki düğüm noktalarının uzaydaki serbestlik derecelerinin kısıtlanması ile modellenmektedir. Sınır koşullarının tanımlanması istenilen kısıtların malzemeye verilmesini sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar analizlerinde hesaplama parametrelerinin dışında tahmin hassasiyetini etkileyen bir diğer önemli unsur malzeme davranışının tanımlanması ve modellenmesidir. Malzeme davranışının modellenmesi, sonlu elemanlar analizi hesap hassasiyeti üzerinde en baskın role sahip parametredir. Bunun ana nedeni, şekil verme işlemleri sırasında malzemenin sergileyeceği davranışın bilinmesi ve malzeme de meydana gelebilecek deformasyonların tespit edilebilmesidir. Böylece malzeme de meydana gelen davranışların önceden tespit edilmesi ile birlikte gerekli telafilerin gerçekleştirilmesi üretim sırasında meydana gelebilecek olan zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçmektedir.

Sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesi bir dizi adımın birbirini takip etmesi sonucu ortaya çıkan sayısal bir yöntemdir. Şekil 3.3.'de sonlu elemanlar analizi iş akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.3. Sonlu elemanlar analizi iş akış şeması

Malzemelerin şekillendirme işlemleri sırasında malzeme davranışının doğru ve hassas bir şekilde tespit edilmesi mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Şekillendirme işlemi sırasında bir malzeme önce elastik sonra plastik şekil değişimine uğramaktadır. Bu nedenle, malzemenin elastik ve plastik davranışının belirlenmesi son derece önem arz etmektedir. Bir malzemenin elastik davranışı lineer olduğu için bu davranışı matematiksel olarak tanımlamak ve modellemek kolay bir işlemdir. Elastik bölgede gerilme ve gerinim değerleri arasında Hooke kanunu vasıtası ile lineer bir ilişki elde edilmektedir (Çetin, 2007). Malzemenin plastik davranışı ise non-lineerlik barındırdığından ve akma gerilmesinin gelişimi pekleşme ile temsil edildiğinden modellenmesi elastik davranışa göre daha zordur (Gürsoy, 2019). Plastik gerinimler, tüm yükleme geçmişine ve gerilme durumuna nasıl ulaştığına bağlıdır. Malzemenin plastik davranışının tanımlanması ise akma fonksiyonları yada plastisite modelleri ile gerçekleştirilmektedir.

3.1. Plastisite Modelleri

Malzemelerin plastik davranışını modelleyen matematiksel ifadeler plastisite modelleri olarak adlandırılmaktadır. Bir malzemenin genel gerilme durumu altında plastik davranışının modellenebilmesi için bir akma kriterine, bir akma kuralına ve bir pekleşme kuralına ihtiyaç vardır (Esener, 2020). Akma kriteri akmanın başlangıcını, akma kuralı gerilme ve gerinim oranı arasındaki ilişkiyi ve pekleşme de başlangıç akma gerilmesinin gelişimini tanımlamaktadır (Slater, 1977). Malzemelerin plastik davranışını modelleyen plastisite modelleri bu pekleşme kurallarını ve malzeme anizotropisini çeşitli kabuller ile bünyelerine entegre etmektedir. Bu kapsam da plastisite modellerini izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme- kinematik pekleşme kabulü yapan modeller olarak üç grupta incelemek mümkündür (Gürsoy ve Esener, 2019). Bu anlamda literatürde birçok gelişmiş plastisite modeli bulunmaktadır (Feng vd., 2019; Javanmardi ve Maheri, 2019; Meng vd., 2019; Zhou vd., 2019). İlk grup olan izotropik malzeme-izotropik pekleşme kabulü yapan plastisite modellerine; Tresca, von Mises, Hershey, Hosford örnek verilebilmektedir. İkinci grup olan anizotropik malzeme-izotropik pekleşme kabulü yapan plastisite modellerine; Hill-48, Barlat-89, Hill-93, Hu-2003 örnek verilebilmektedir. Son grup olan anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan plastisite modellerine; Yoshida- Uemori örnek verilebilir (Banabic, 2010). Fakat bu plastisite modellerini uygulamak için girdi parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu girdi parametreleri mekanik testler yardımı ile elde edilmektedir. Plastisite modellerinin ihtiyaç duyduğu girdi parametreleri ve bu parametrelerin sayısı çeşitlilik göstermektedir. Şöyle ki, 18 parametre ile modelleme yapabilen plastisite modelleri

(Esmailpour vd., 2018) mevcutken 11 parametre ile daha hassas modelleme yapabilen plastisite modelleri mevcuttur (Soare ve Barlat, 2011). Parametre sayısının artması çözüm için ihtiyaç duyulan mekanik test sayısının ve optimizasyon işlem sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple çözüm için seçilecek olan plastisite modelinin daha az sayıda parametre içermesi hesaplama süresi açısından avantajlı olacaktır. Bu nedenle günümüzde az sayıda parametre ile hassas ve doğru işlem yapabilen Hill48 modeli hala en yaygın kullanılan modeller arasındadır. Plastisite modellerinin mevcut bünye denklemleri ile analitik olarak malzemelerin plastisite modellemesi, akma yüzeyleri ya da yöne bağlı anizotropi katsayısı ve akma gerilmesi oranları elde edilebilmektedir. Sahip oldukları bu avantajlar neticesinde malzemelerin plastik davranışını tanımlamak için plastisite modellerine duyulan ihtiyaç artmıştır. Günümüzün bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle de birlikte plastisite modelleri sonlu elemanlar yazılımlarına entegre edilmiştir. Böylece bilgisayar destekli tasarımın yaygın olarak kullanıldığı otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında plastisite modelleri yer almaya başlamıştır. Tezin bu bölümünde tez çalışmasında kullanılan Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modellerine yer verilmiştir.

3.1.1. Hill-48 Plastisite Modeli

1948 Hill anizotropik bir akma kriteri sunmuştur (Hill, 1948). Bu kriterde malzeme üç ortogonal simetri düzleminde anizotropiye sahiptir. Aynı zamanda bu kriter izotropik pekleşme davranışı kullanmaktadır. Hill-48 kriterinin en genel formu Denklem (2)'teki gibi yazılabilir.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (2)$$

Hill-48 akma kriterinde yer alan F, G, H, L, M ve N sabitleri akma gerilmelerine (σ) ve anizotropi katsayılarına (r) bağlı olarak iki farklı yöntemle tanımlanabilmektedir. Bu nedenle anizotropi katsayılarının tanımlanması ile anizotropi tabanlı Hill-48, akma gerilmelerinin tanımlanması ile ise gerilme tabanlı Hill-48 modeli çözülmektedir.

Sac metal malzemelerin kalınlık yönleri diğer iki yönlerine nazaran çok küçüktür. Bu nedenle sac metal proseslerinde kalınlık yönündeki gerilmeler ihmal edilmektedir. İhmal edilen kalınlık yönü ile sac metal problemleri 3 boyutlu halden 2 boyutlu hale gelmektedir. Böylece 2 boyutlu yüzey modelleme yapılmaktadır. Yapılan 2 boyutlu modelleme ise düzlem gerilme problemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sebeple de plastisite modelleri düzlem gerilme problemleri olarak çözülmektedir. Düzlem gerilme durumu için Hill-48 kriteri Denklem (3)'teki gibi yazılabilir.

$$2f(\sigma_{1j}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (3)$$

Hill-48'in r tabanlı hesaplamasında; F, G, H ve N sabitlerinin anizotropi katsayıları ile ilişkileri Denklem (4)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} F &= \frac{r_0}{(1+r_0)(r_{90})} \\ G &= \frac{1}{(1+r_0)} \\ H &= \frac{r_0}{(1+r_0)} \\ N &= \frac{(r_0 + r_{90})(2r_{45} + 1)}{(2(1+r_0))r_{90}} \end{aligned} \quad (4)$$

Burada r_0 , r_{45} ve r_{90} sırasıyla hadde yönündeki, hadde yönüne 45 derecedeki ve hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi katsayılarını temsil etmektedir. Metallerin anizotropilerinin tanımlanmasında bu kriter basit yaklaşımından dolayı oldukça avantajlıdır ve bu avantaj bu kriterin günümüzde hala en sık kullanılan kriterlerden birisi olmasını sağlamaktadır.

Hill-48 modelinin gerilme (σ) tabanlı hesaplamasında; F, G, H ve N sabitlerinin akma gerilmesi ile ilişkileri Denklem (5)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right) \\ G &= \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right) \\ H &= \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right) \\ N &= \frac{1}{2} \left(\left(\frac{2\sigma_0}{\sigma_{45}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Burada σ_0 , σ_{45} ve σ_{90} sırasıyla hadde yönündeki, hadde yönüne 45 derecedeki ve hadde yönüne 90 derecedeki akma gerilmelerini temsil etmektedir.

3.1.2. Barlat-89 Plastisite Modeli

1989 yılında Barlat and Lian düzlemsel anizotropi içeren malzemeler için bir kriter önermişlerdir. Barlat-89 kriteri Denklem (6)'daki şekilde yazılabilmektedir.

$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (6)$$

Burada “M” üsteli malzemenin kristal kafes yapısına bağlı bir üsteldir. k_1 ve k_2 sabitleri ise Denklem (7)'deki şekilde yazılabilir.

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2}; k_2 = \left[\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

a, c ve h malzeme parametreleri olup Denklem (8)'deki şekilde yazılabilirler.

$$a = 2 - c = 2 - 2 \sqrt{\left(\frac{r_0}{1+r_0} \right) \left(\frac{r_{90}}{1+r_{90}} \right)}$$
$$h = \sqrt{\left(\frac{r_0}{1+r_0} \right) \left(\frac{1+r_{90}}{r_{90}} \right)} \quad (8)$$

“p” parametresi ise optimizasyon ile bulunabilmektedir. Barlat-89 modeli de basit yapısı ve az sayıda malzeme parametresine ihtiyaç duymasından dolayı sonlu elemanlar analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

3.2. Bölüm Değerlendirmesi

Karmaşık yapıda mühendislik problemlerinin analitik veya deneysel olarak çözümünün mümkün olmadığı ya da zaman ve maliyet açısından büyük kayıplara neden olduğu durumlarda sonlu elemanlar analizinin önemi ortaya çıkmaktadır. Sonlu elemanlar analizi bu nedenle karmaşık ve zor mühendislik problemlerini çözebilme kabiliyeti açısından hem akademi hem de endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Mühendislik disiplinlerinde meydana gelen gelişime ve ilerlemeye paralel olarak artan rekabet gücü ve seri imalat hızı hatasız ürün formu elde etmeyi gereklilik haline getirmiştir. Bu nedenle sonlu elemanlar analizlerinden doğru ve hassas tahmin sonuçları beklenmektedir.

Tahmin hassasiyetinin artması adına malzeme davranışının doğru bir şekilde tanımlanması ve modellenmesi son derece önemlidir. Bu anlamda da malzemenin plastik davranışını modelleyen plastisite modellerinin seçimi doğrudan sonlu elemanlar analiz sonuçlarını etkilemektedir.

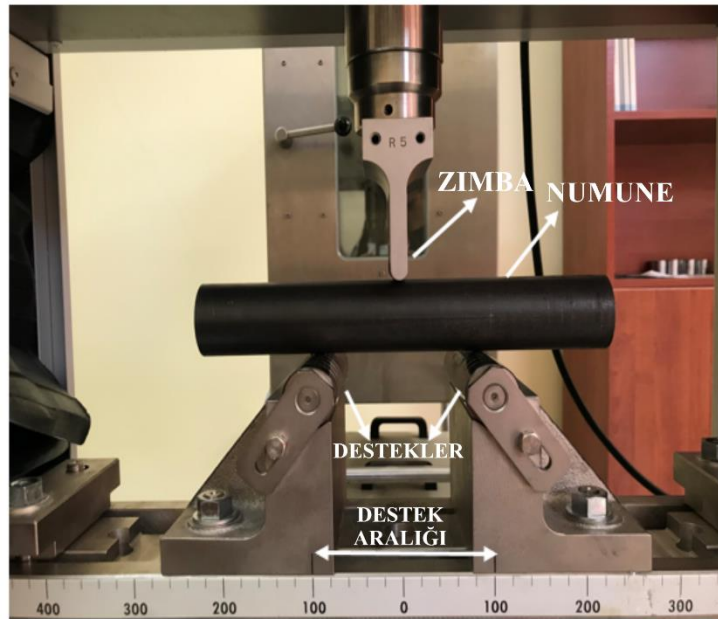


4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Tez çalışması kapsamında ince cidarlı St37 malzemesinin üç nokta eğme yüklemesi altında davranışı farklı proses parametreleriyle incelenmiştir. Bu doğrultuda üç farklı kesit profili ve üç farklı destek aralığı mesafesi proses parametreleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca tüm prosesler Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve plastisite modellerinin ince cidarlı yapıların eğilme davranışını tahmin performansları ortaya konmuştur.

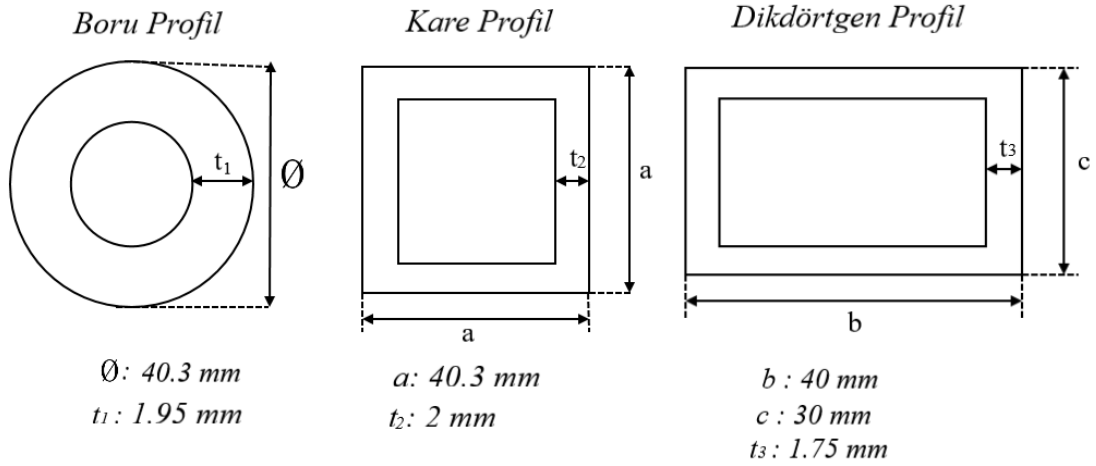
4.1. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışmasının deneysel kısmında, malzemenin mukavemetini tespit etmek ve eğilme davranışını belirlemek adına üç nokta eğme deneyi gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyi, Şekil 4.1.'de gösterildiği üzere, iki destek üzerine serbest olarak oturtulmuş bir numunenin orta noktasına bir zimba vasıtasıyla yük uygulama işlemidir.



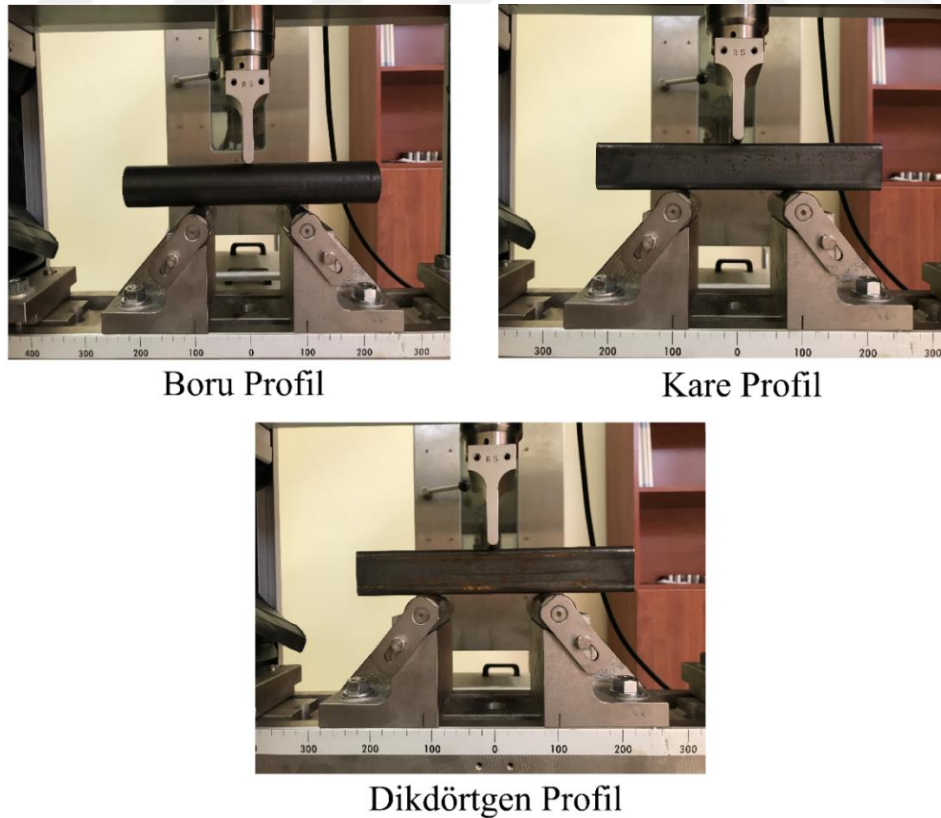
Şekil 4.1. Üç nokta eğme deneyi

Deneylerde kullanılan zimbanın yarıçapı 5 mm iken desteklerin yarıçapı 15 mm'dir. Deneyler 25 mm/dk sabit hız ve 40 mm sabit stroke da gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi olarak boru kesit profil, kare kesit profil ve dikdörtgen kesit profil kullanılmış olup tüm numunelerin boyu 250 mm'dir. Şekil 4.2.'de deney numunelerinin ölçü teknik resmi gösterilmiştir.

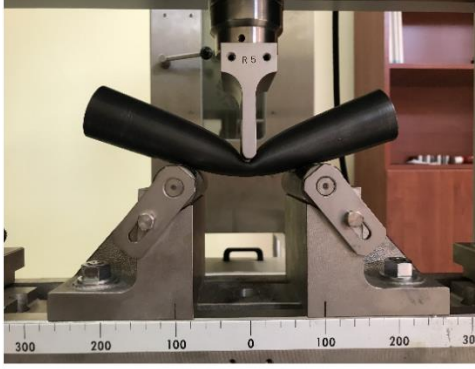


Şekil 4.2. Numune ölçü teknik resimleri

Deney prosesi sabit boy, sabit stroke ve sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Üç farklı kesite sahip profillerin testleri üç farklı destek aralığında (S: 100 mm, 160 mm, 200 mm) gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerin de 100 mm destek aralığı S100, 160 mm destek aralığı S160 ve 200 mm destek aralığı S200 olarak adlandırılmıştır. Her bir kesit için üç farklı destek aralığında ve her destek aralığı için ise deneyler 2 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3.'de üç farklı kesite sahip profillerin deforme edilmemiş halleri gösterilmiştir. Şekil 4.4.'de deforme edilmiş halleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Üç farklı kesite sahip deforme olmamış profiller



Boru Profil



Kare Profil



Dikdörtgen Profil

Şekil 4.4. Üç farklı kesite sahip deforme olmuş profiller

Üç nokta eğme deneyi sonrasında her bir kesit için farklı destek aralıklarında deforme olmuş profillerin karşılaştırılmalı fotoğrafları Şekil 4.5 - 4.7'de gösterilmiştir.

Boru Profil



$S = 200 \text{ mm}$

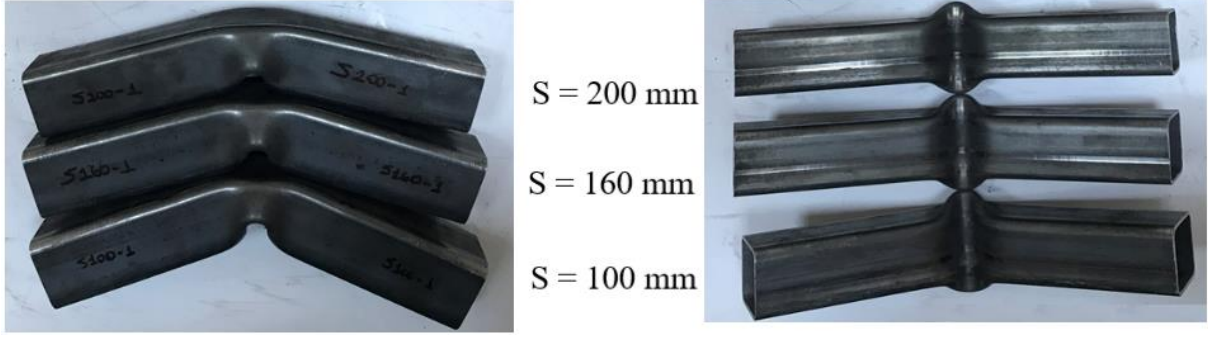
$S = 160 \text{ mm}$

$S = 100 \text{ mm}$



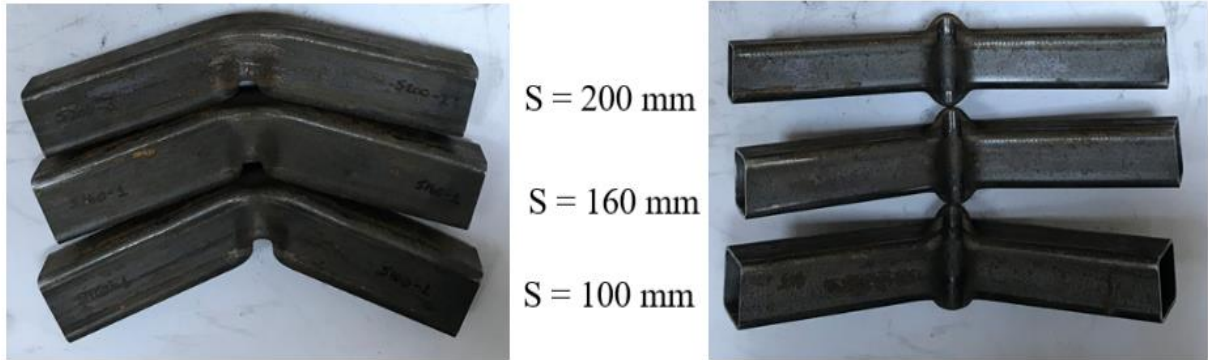
Şekil 4.5. Boru kesit profillerin üç farklı destek aralığında deforme olmuş halleri

Kare Profil



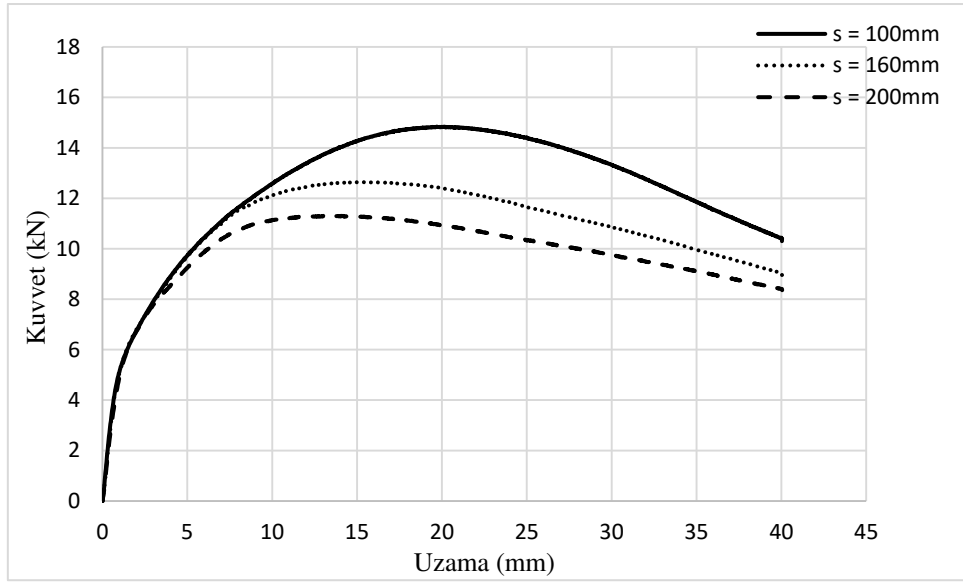
Şekil 4.6. Kare kesit profillerin üç farklı destek aralığında deforme olmuş halleri

Dikdörtgen Profil

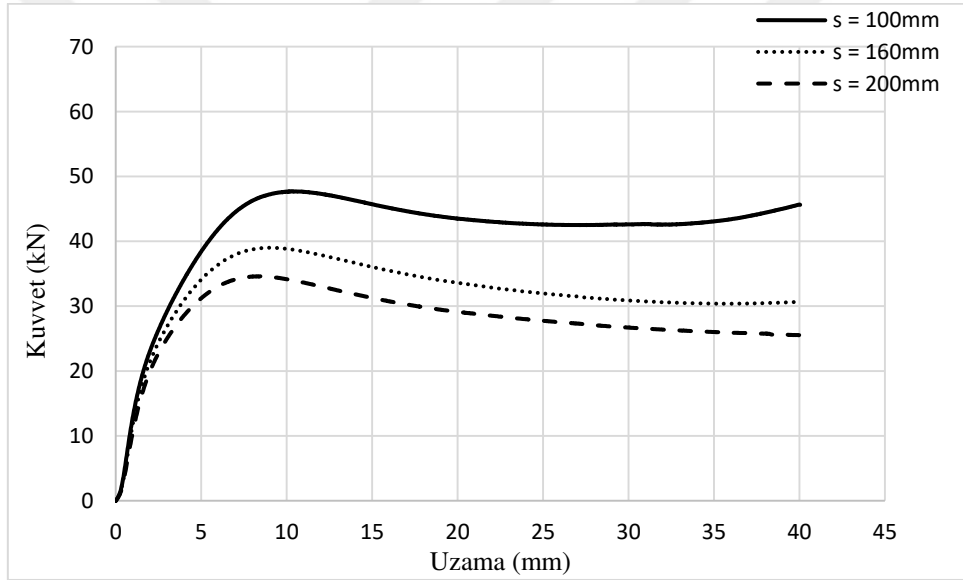


Şekil 4.7. Dikdörtgen kesit profillerin üç farklı destek aralığında deforme olmuş halleri

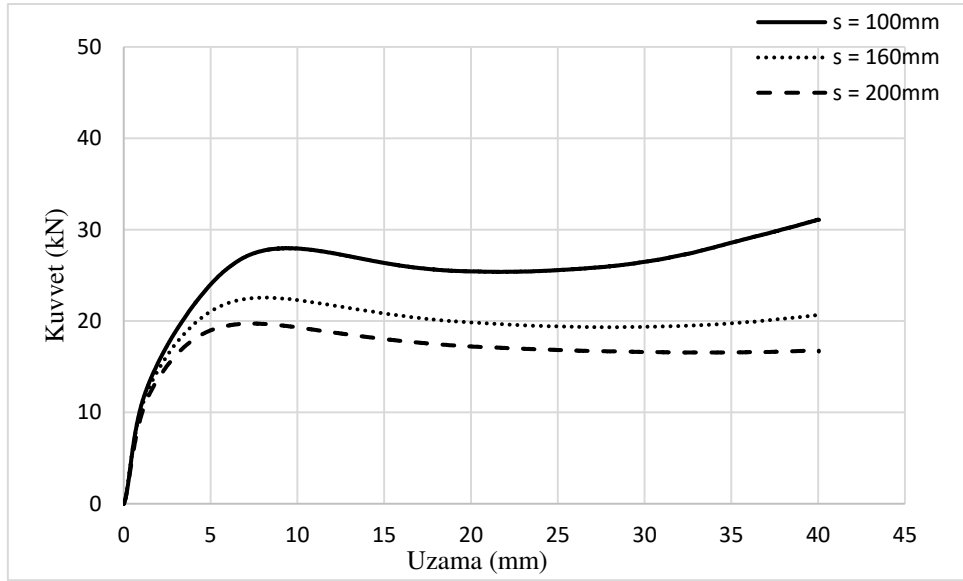
Üç nokta eğme deneyleri sırasında test cihazından yük ölçüleri vasıtasıyla kuvvet değerleri ve deplasman (uzama) değerleri alınmıştır. Böylelikle test cihazından kuvvet-uzama verilerini elde etmek mümkün olmaktadır. Daha sonrasında da elde edilen bu kuvvet-uzama değerleri kullanılarak malzemelerde üç nokta eğme altında deplasman değerlerine bağlı kuvvetin değişim grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerde Şekil 4.8 - 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.8. Boru Profil Kuvvet-Uzama Grafikleri



Şekil 4.9. Kare Profil Kuvvet-Uzama Grafikleri



Şekil 4.10. Dikdörtgen Profil Kuvvet-Uzama Grafikleri

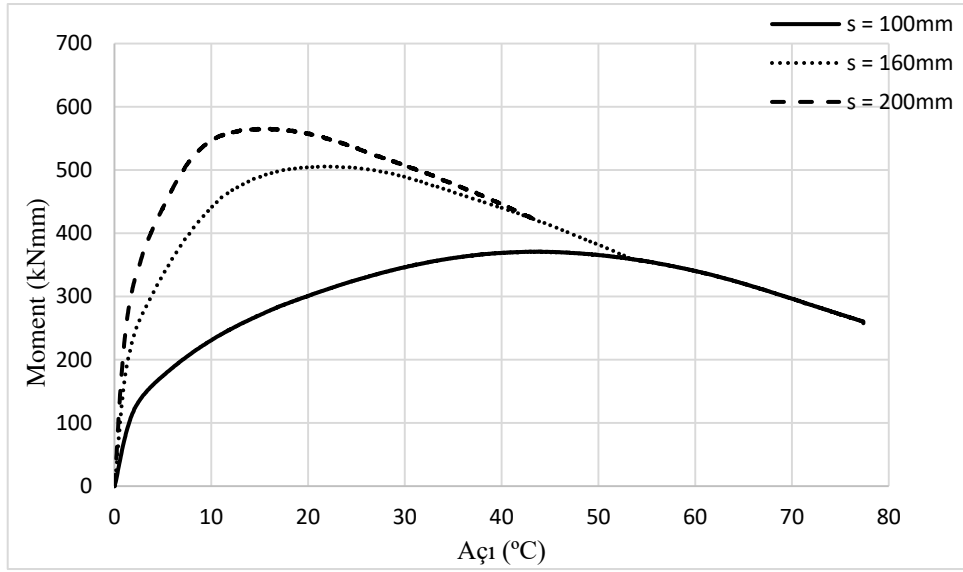
Daha sonra elde edilen bu kuvvet-uzama verilerinden moment-açı değerleri elde edilmiştir. Moment-açı değerlerinin hesabı, Chen tarafından alüminyum köpük dolgu şapka profillerin eğilme davranışı üzerine yapılan çalışma da ortaya konmuştur (Chen, 2001:7932). İlgili denklemler aşağıda verilmiştir.

$$M = \frac{P \times s}{4} \quad 1$$

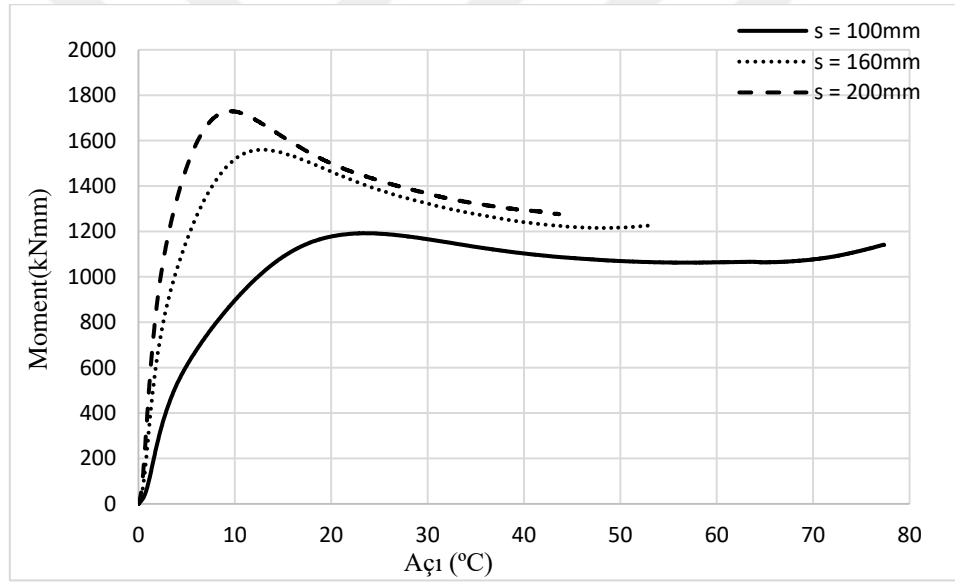
$$\theta = 2 \arctan \frac{2\delta}{s} \quad 2$$

Burada P ve S, sırasıyla üç nokta eğme deneyindeki zımba kuvveti ve destek aralığıdır. δ ise uzamadır.

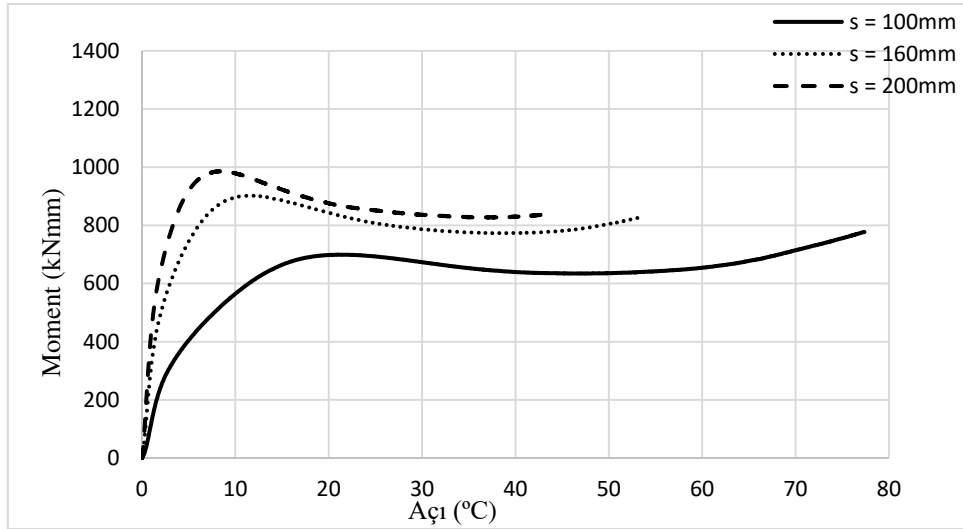
Bu denklemler kullanılarak deneylerden elde edilen kuvvet-uzama grafikleri moment-açı grafiklerine dönüştürülmüştür. Şekil 4.11. ve Şekil 4.13 arasında verilmektedir.



Şekil 4.11. Boru Profil Moment-Açı Grafikleri



Şekil 4.12. Kare Profil Moment-Açı Grafikleri



Şekil 4.13. Dikdörtgen Profil Moment-Açı Grafikleri

DeneySEL çalışmaların son aşamasında üç farklı kesite sahip St-37 profillerin enerji absorbe etme karakteristikleri de ortaya konulmuştur. Bu enerji absorpsiyon değerleri kuvvet-uzama grafiklerinin altında kalan alan olarak değerlendirilmiş ve her bir profil ve her bir farklı destek aralığı için enerji absorpsiyon değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerde Tablo 4.1.' de verilmiştir.

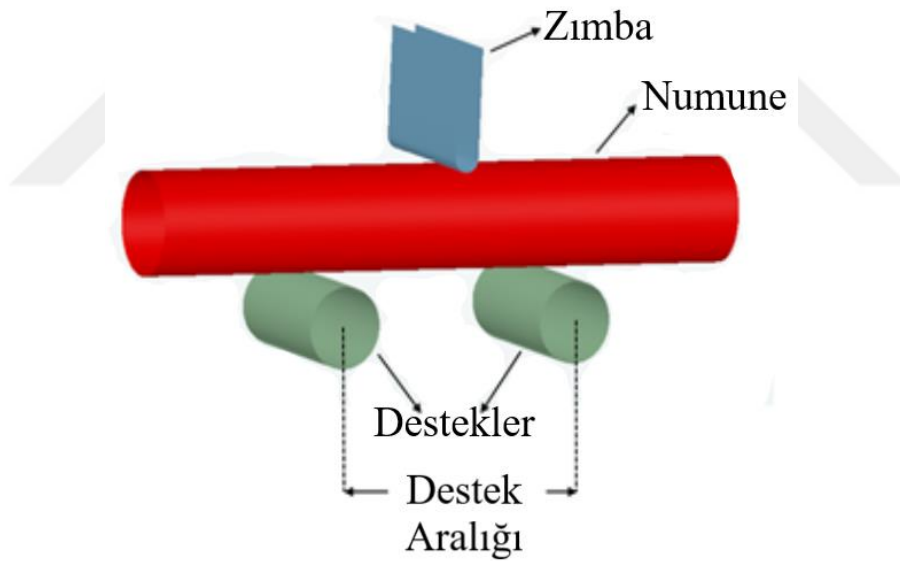
Tablo 4.1. Farklı Kesitli Profillerin Enerji Değerleri

Profil Kesiti	Destek Aralığı	Enerji Değeri (J)
Boru Kesit	100 mm	493,186
	160 mm	431,278
	200 mm	391,961
Kare Kesit	100 mm	1662,410
	160 mm	1285,050
	200 mm	1122,713
Dikdörtgen Kesit	100 mm	1023,389
	160 mm	787,760
	200 mm	681,425

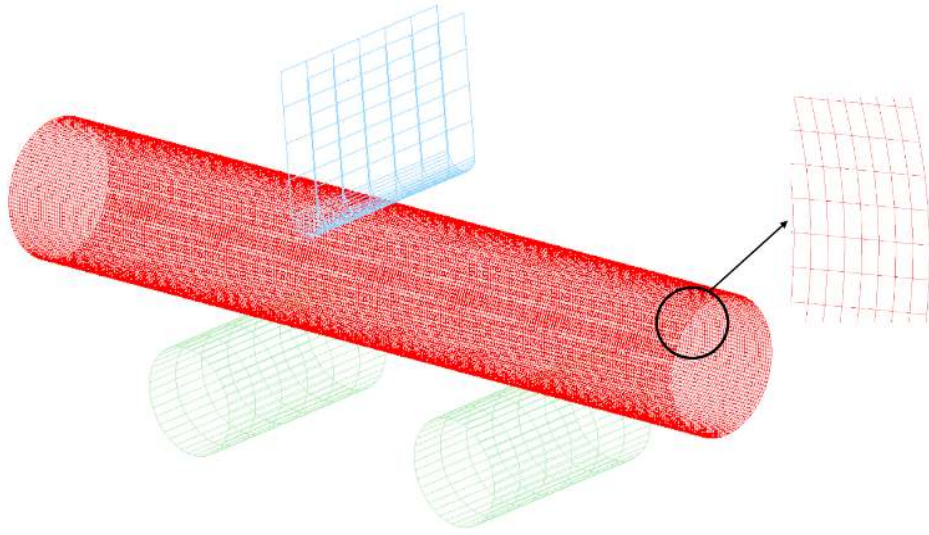
Deneyisel çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde tüm kesitlerde artan destek aralığında kuvvet değerlerinin azaldığı görülmektedir. Buna karşın tüm kesitlerde artan destek aralıklarında moment değerlerinin arttığı görülmektedir. Enerji absorpsiyon değerleri incelendiğinde ise artan destek aralıklarında enerji değerlerinin azalma sergilediği görülmektedir.

4.2. Sonlu Elemanlar Analizleri

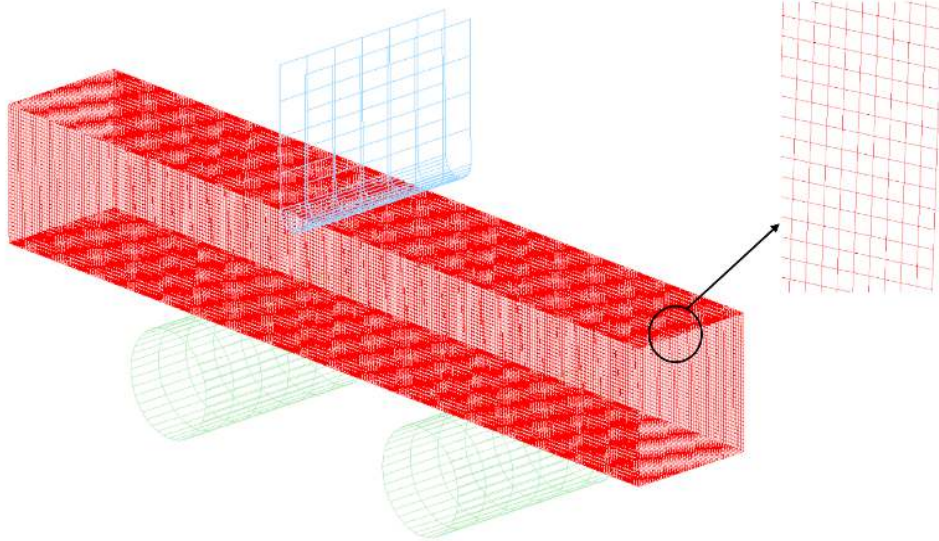
Yukarıda anlatılan deneyisel çalışmalar deney koşullarıyla aynı olacak şekilde sonlu elemanlar analizleriyle de hesaplanmıştır. Burada sonlu elemanlar ticari yazılımı olan Dynaform 5.9.3. versiyonu kullanılmıştır. Kalıp takımları rijit gövde olarak modellenip ince cidarlı yapılar deforme olabilen ağ yapısı ile modellenmiştir. Bu anlamda modelleme yapılırken kabuk elemanlar kullanılmıştır. Şekil 4.14’de üç nokta eğme deneyinin sonlu elemanlar modeli verilmektedir. Şekil 4.15 - 4.17’de boru, kare ve dikdörtgen kesite sahip profillerin sonlu elemanlar modelleri görülmektedir.



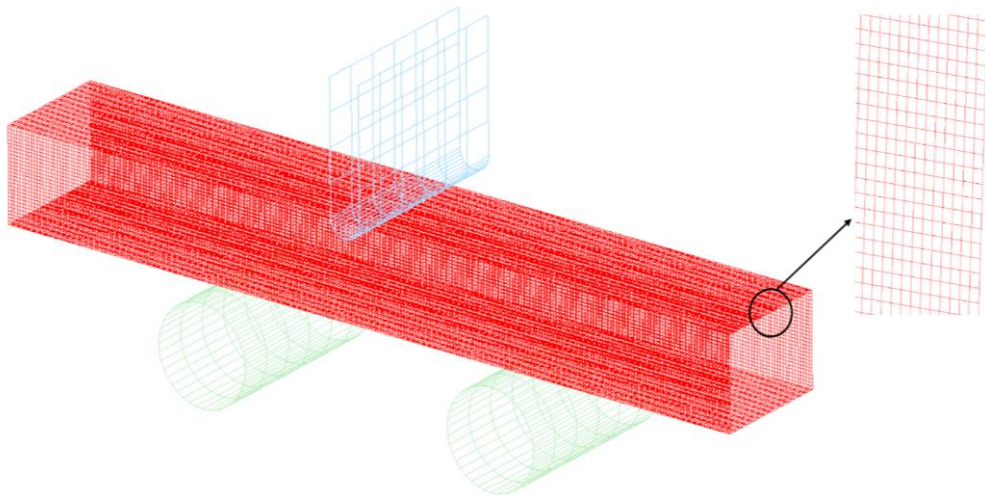
Şekil 14. Üç nokta eğme deneyi sonlu elemanlar modeli



Şekil 4.15. Boru Kesit Profilin Sonlu Elemanlar Modeli



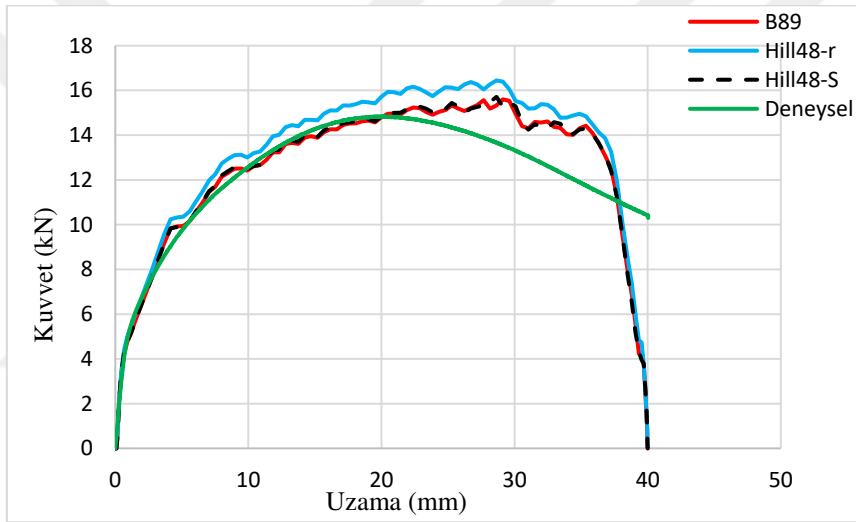
Şekil 4.16. Kare Kesit Profilin Sonlu Elemanlar Modeli



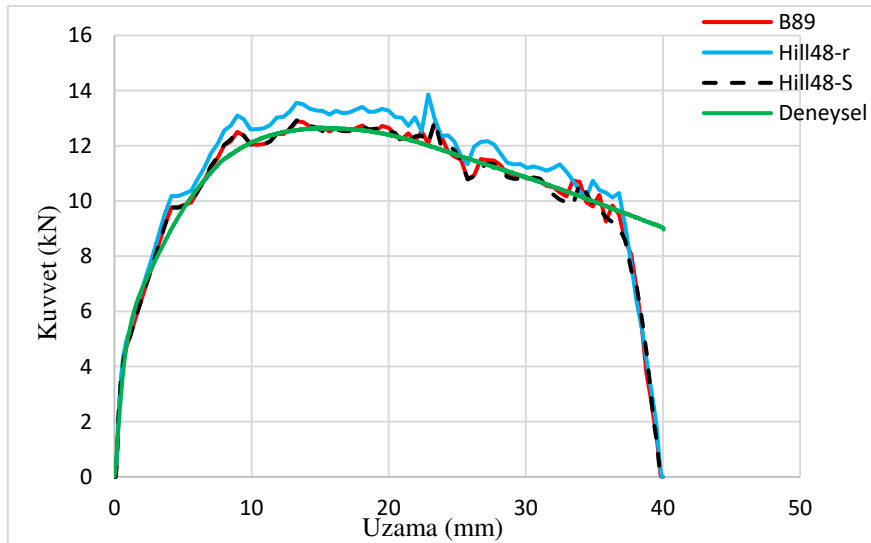
Şekil 4.17. Dikdörtgen Kesit Profilin Sonlu Elemanlar Modeli

Eleman boyutu olarak tüm profillerde 1mm boyuta sahip kabuk elemanlar tercih edilmiştir. Tüp profilin eleman sayısı 30000 adet, Kare profilin eleman sayısı 38000 adet, dikdörtgen profilin eleman sayısı 33000 adettir.

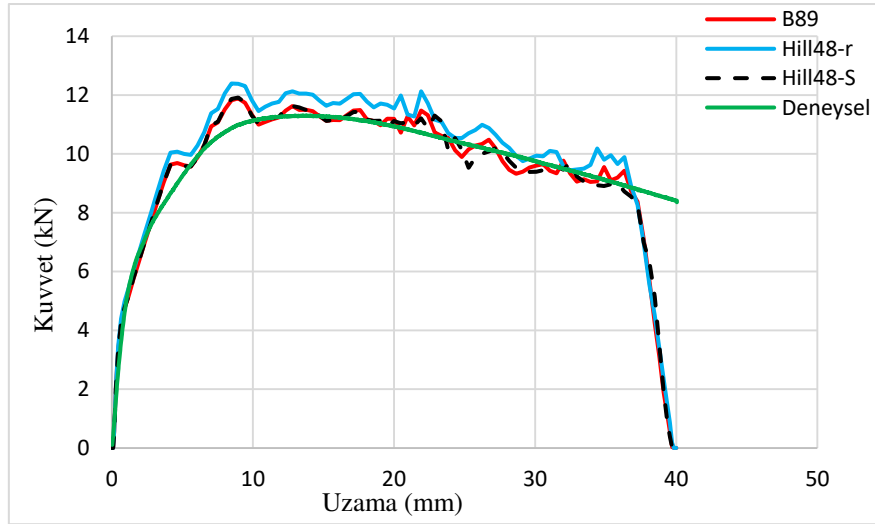
Bu anlamda bölüm 3 de bahsedilen Hill-48 ve Barlat-89 plastisite modelleri kullanılmıştır. Hill-48 modeli gerilme tabanlı (Hill48-S) ve anizotropi katsayısı tabanlı (Hill48-r) olarak iki versiyonlu ile kullanılmıştır. Böylelikle 3 farklı plastisite modeli ile proseslerin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Yine sonlu elemanlar analizlerinden kuvvet-uzama grafikleri elde edilmiş ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Kıyaslanan veriler Şekil 4.18 - 4.26'da gösterilmiştir.



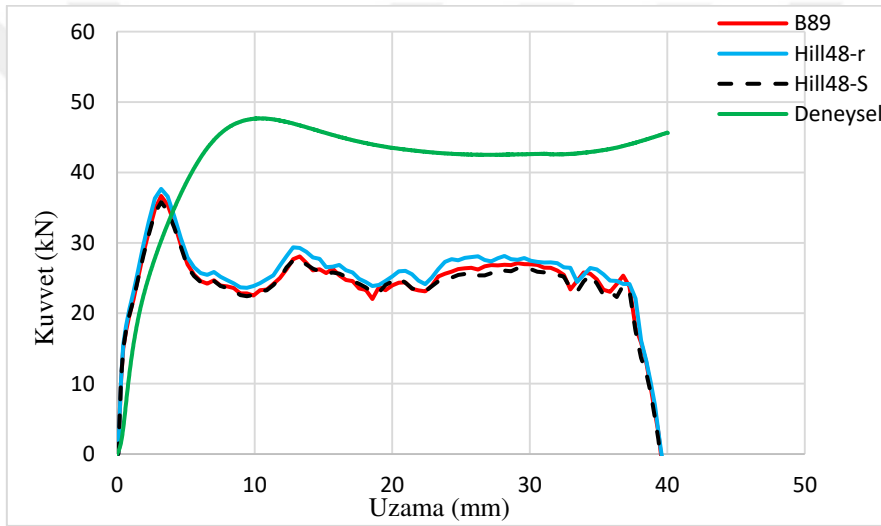
Şekil 4.18. 100 mm Destek Aralığında Boru Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması



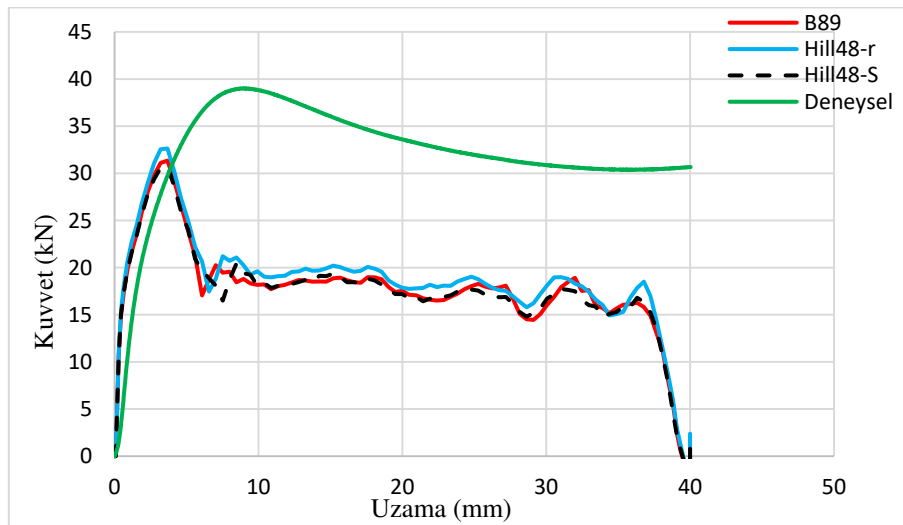
Şekil 4.19. 160 mm Destek Aralığında Boru Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması



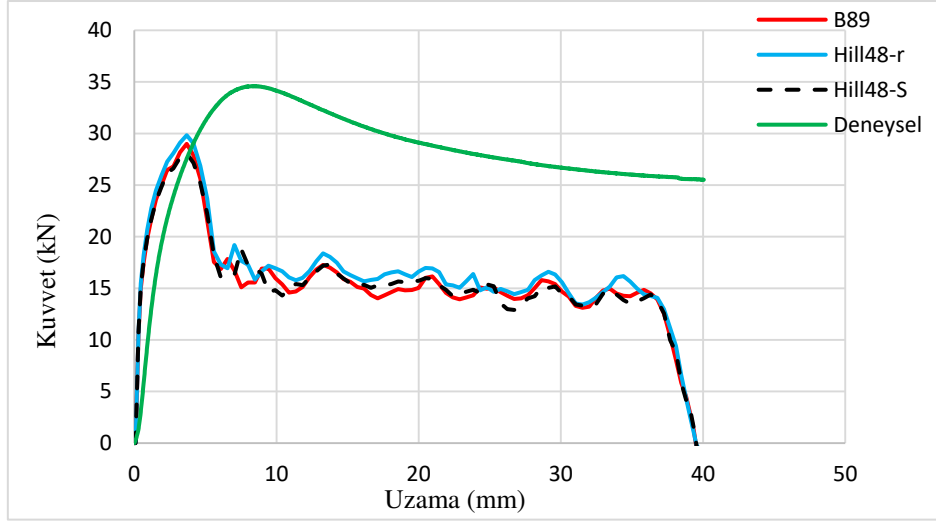
Şekil 4.20. 200 mm Destek Aralığında Boru Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması



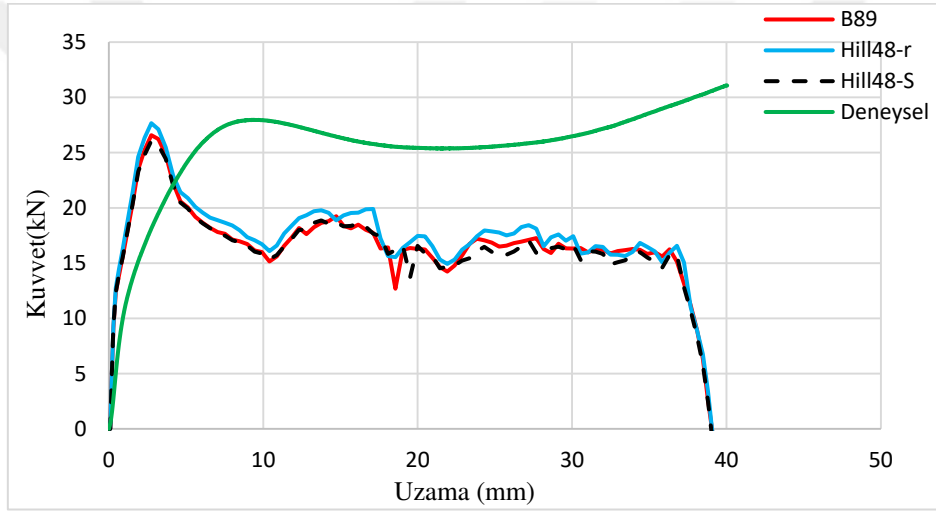
Şekil 4.21. 100 mm Destek Aralığında Kare Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması



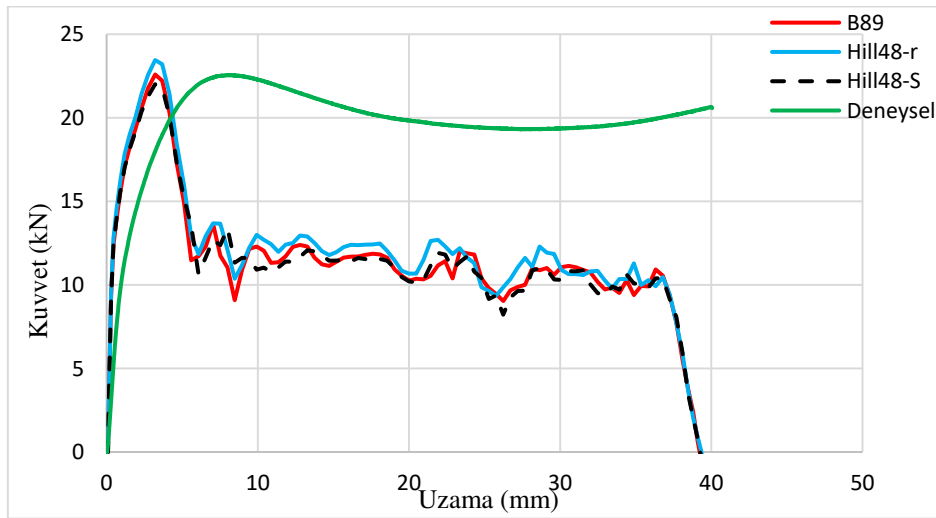
Şekil 4.22. 160 mm Destek Aralığında Kare Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması



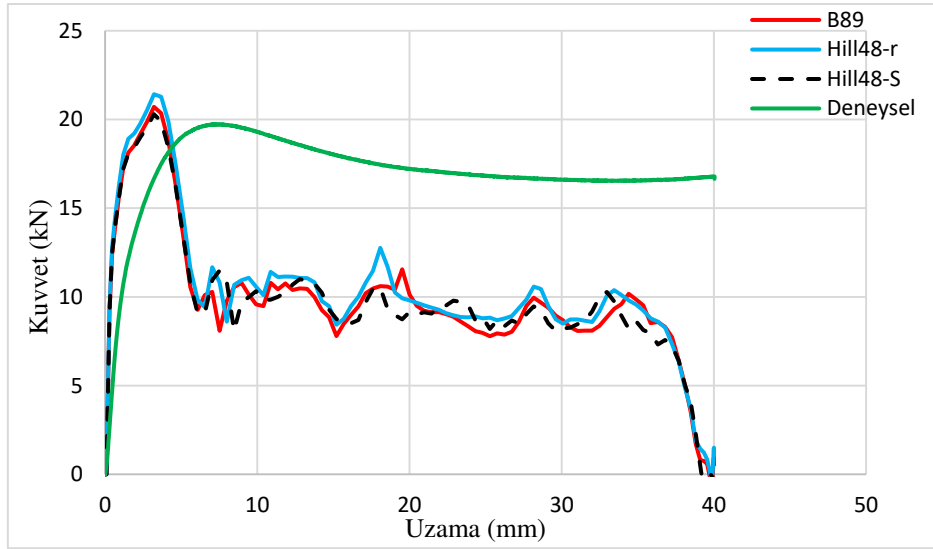
Şekil 4.23. 200 mm Destek Aralığında Kare Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması



Şekil 4.24. 100 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması

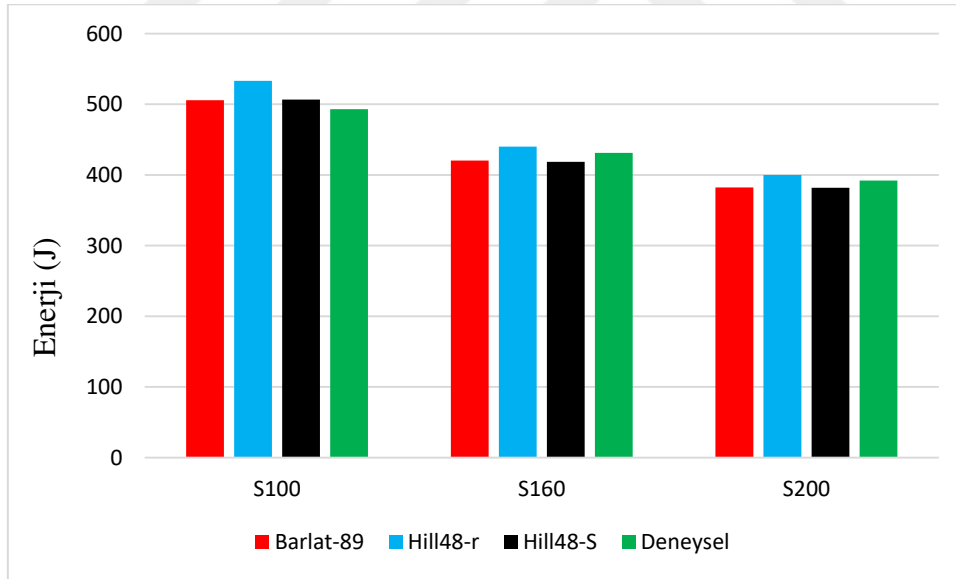


Şekil 4.25. 160 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması

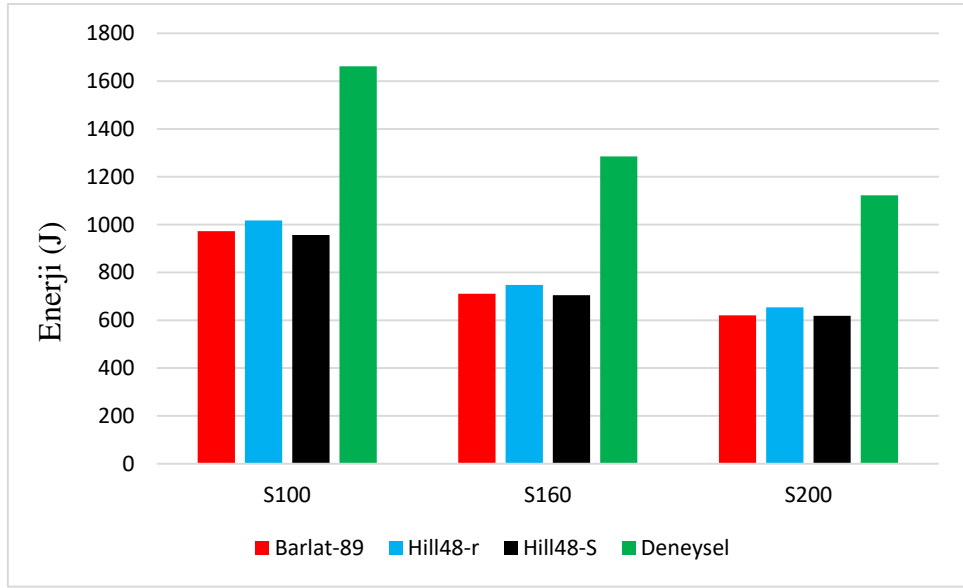


Şekil 4.26. 200 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesit Profilin Kuvvet-Uzama Karşılaştırması

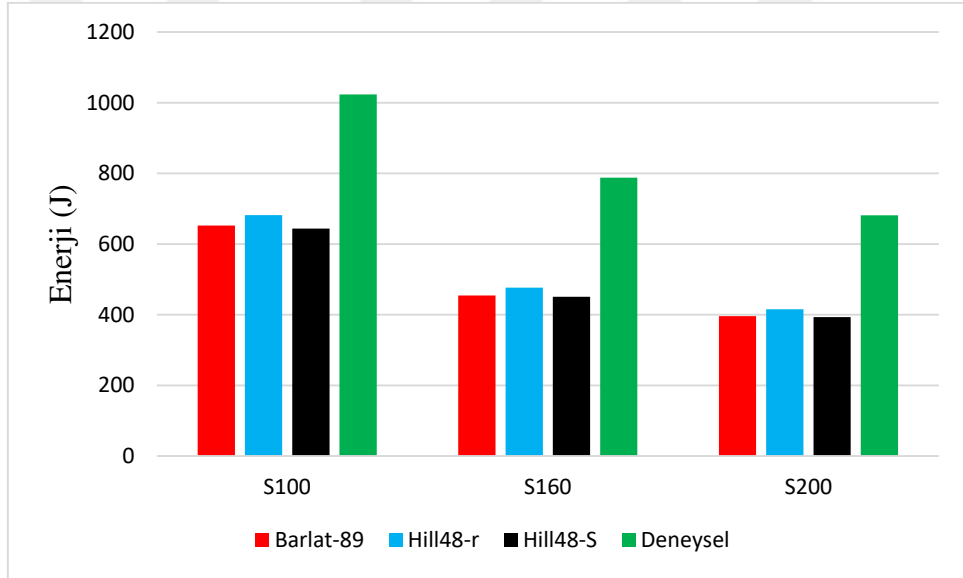
Daha sonrasında nümerik anlamda da enerji absorpsiyon karakteristikleri hesaplanmıştır. Aşağıda Şekil 4.27 - 4.29' da üç farklı kesite sahip deney numunelerinin nümerik analizler sonucunda hesaplanan absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanma grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.27. Nümerik analizler sonrasında boru kesitli profillerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanması

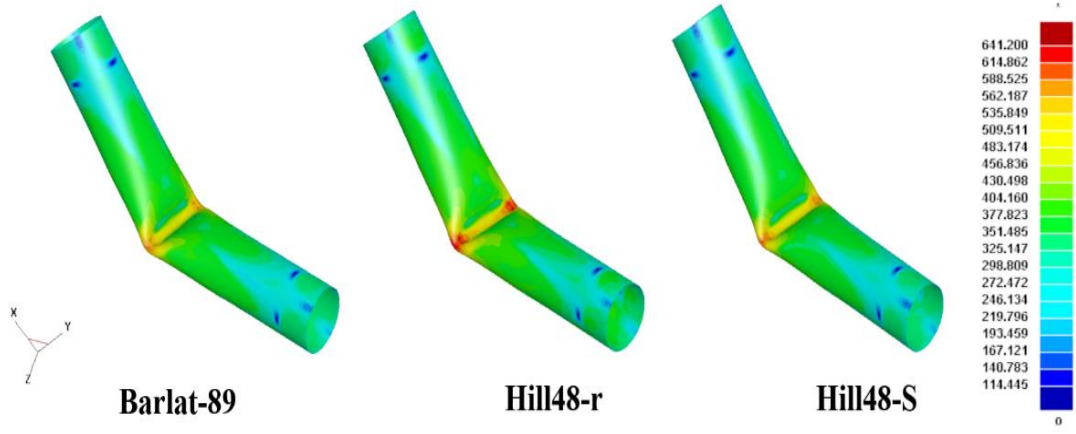


Şekil 4.28. Nümerik analizler sonrasında kare kesitli profillerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanması

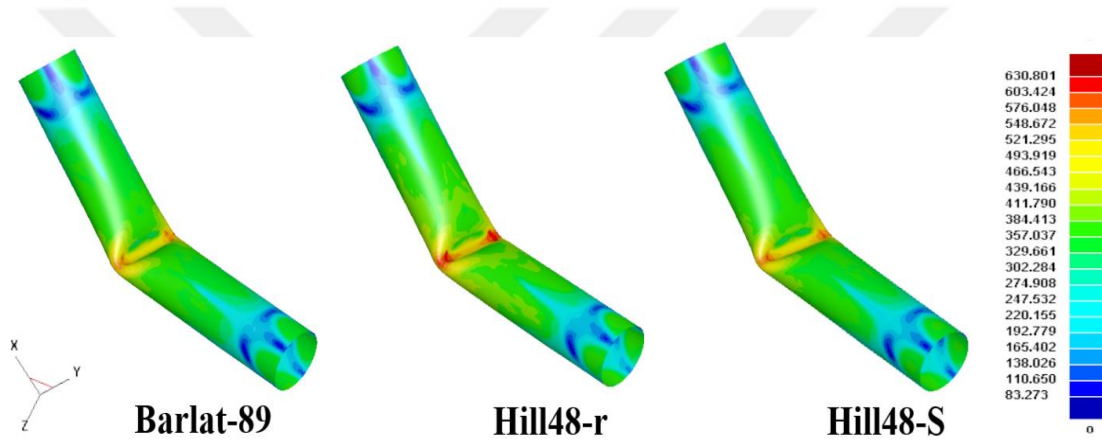


Şekil 4.29. Nümerik analizler sonrasında dikdörtgen kesitli profillerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin kıyaslanması

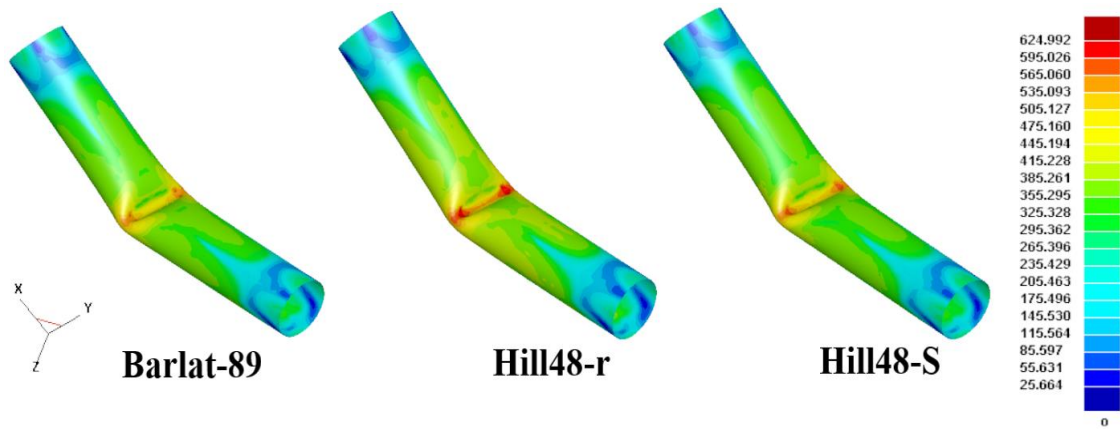
Sonlu elemanlar analizleri sonrasında eş değer gerilme dağılımları da Şekil 4.30 - 4.38'de verilmiştir.



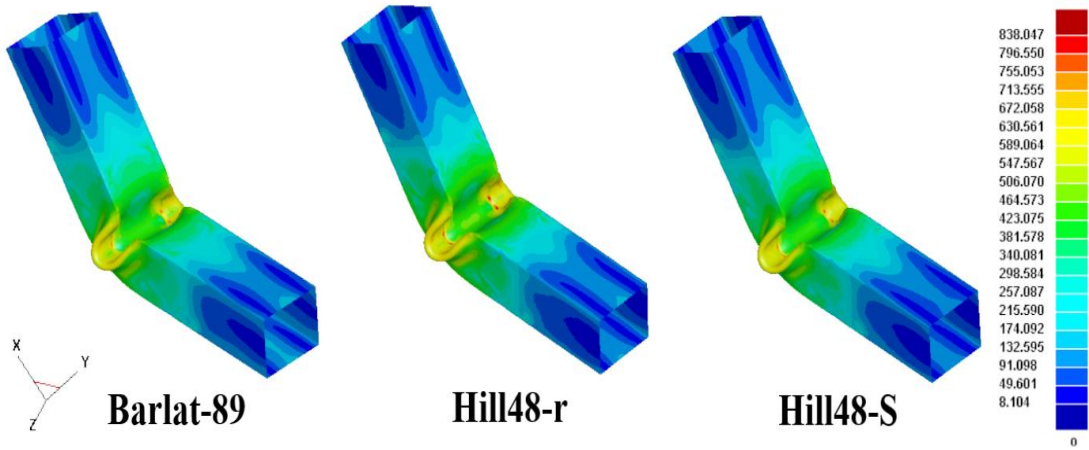
Şekil 4.30. 100 mm Destek Aralığında Boru Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



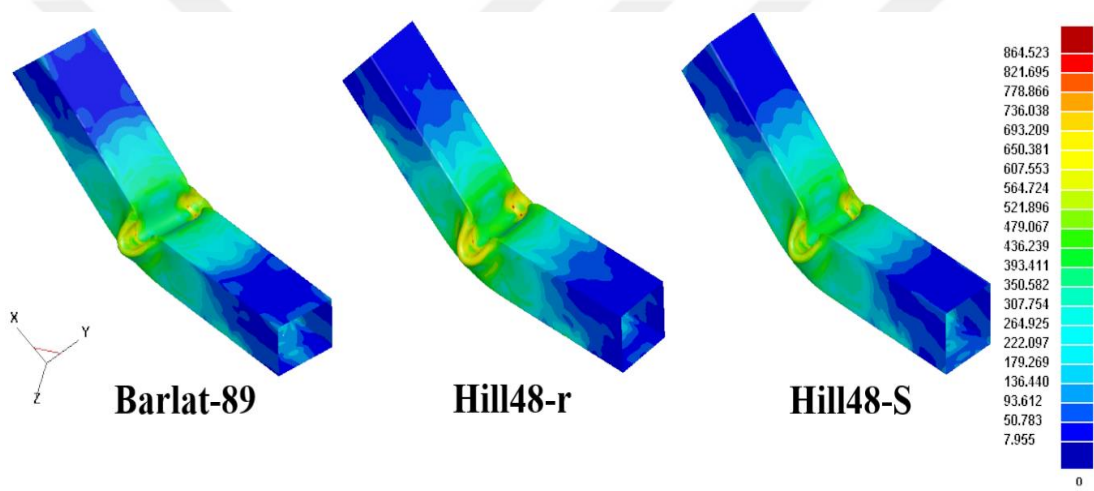
Şekil 4.31. 160 mm Destek Aralığında Boru Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



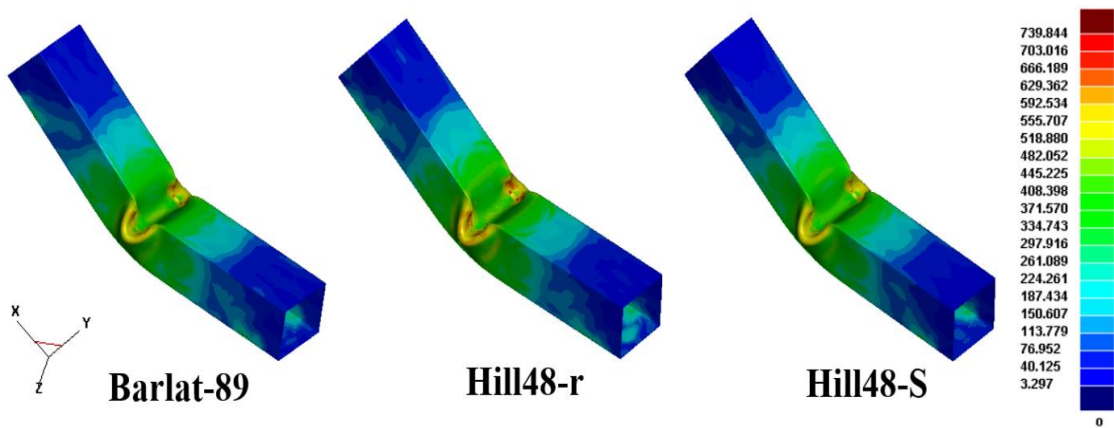
Şekil 4.32. 200 mm Destek Aralığında Boru Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



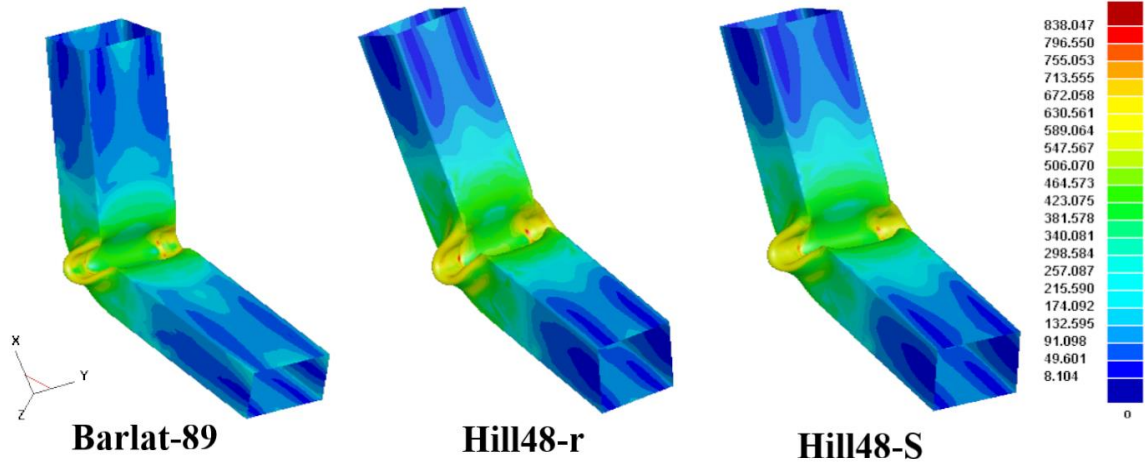
Şekil 4.33. 100 mm Destek Aralığında Kare Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



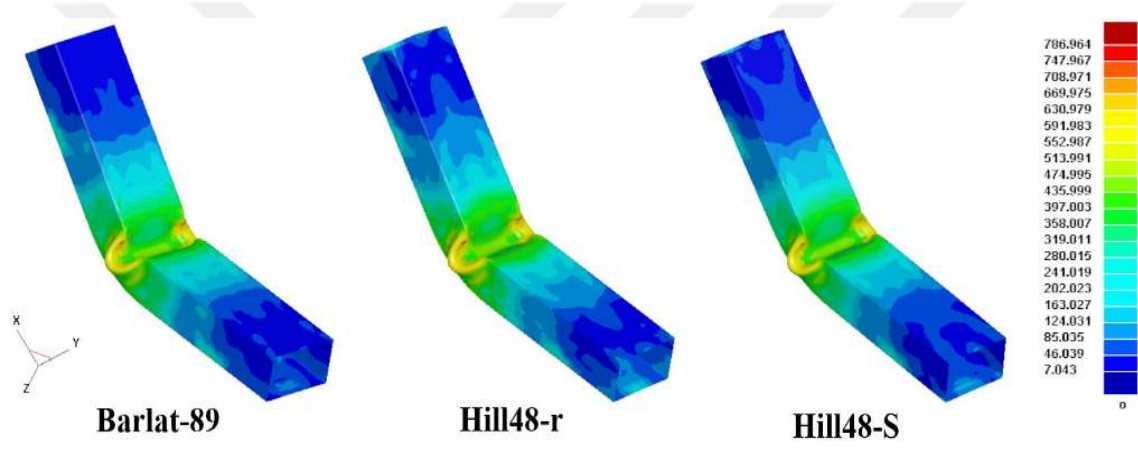
Şekil 4.34. 160 mm Destek Aralığında Kare Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



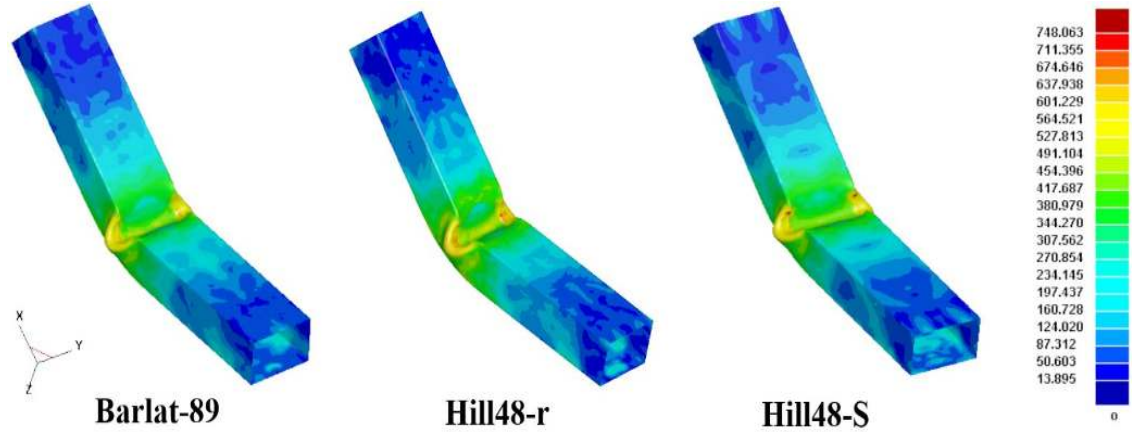
Şekil 4.35. 200 mm Destek Aralığında Kare Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



Şekil 4.36. 100 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



Şekil 4.37. 160 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları



Şekil 4.38. 200 mm Destek Aralığında Dikdörtgen Kesitli Profillerin Nümerik Analiz Sonrasında Eşdeğer Gerilme Dağılımları

Boru kesit profillerin sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde Barlat-89 ve Hill48-S plastisite modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Boru kesitte artan destek aralığı ile paralel olarak bu uyumun arttığı görülmüştür. Şöyle ki boru kesitin S100 grafiğinde uzamanın 20 mm olduğu noktadan sonra deneysel veri ile Barlat-89 ve Hill48-S plastisite verileri arasında bir sapma meydana gelirken S160 ve S200 grafiklerinde tamamiyle uyum söz konusudur. Boru kesitli profillerin sonlu elemanlar enerji absorpsiyon değerleri de kuvvet-uzama değerlerine paralel olarak Barlat-89 ve Hill48-S plastisite modelleri ile deneysel veriler uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

Kare kesit profillerin sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde ise üç plastisite modelinin de yaklaşık 4 mm uzama mesafesinden sonra deneysel sonuçlardan sapma sergilemiştir. Artan destek aralıkları ile plastisite modelleri ile deneysel veriler arasında ki sapma da azalma görülmektedir. Ayrıca üç plastisite modeli birbirine uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Kare kesitli profillerin sonlu elemanlar enerji absorpsiyon değerleri de kuvvet-uzama değerlerine paralel olarak artan destek aralıklarında deneysel enerji değerlerine yakınsama sergilemiştir.

Son olarak ise dikdörtgen kesit profillerin sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde, üç plastisite modeli birbirine yakın sonuçlar verirken bu sonuçlar deneysel verilerden farklıdır. Şöyle ki artan destek aralığında sapma azalmış ve deneysel sonuçlara yakınsama gözlemlenmiştir. Dikdörtgen kesitli profillerin sonlu elemanlar enerji absorpsiyon değerleri de kuvvet-uzama değerlerine paralel olarak artan destek aralığı ile deneysel sonuçlara yakınsama göstermiştir.

Sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde; tüm kesitlerde artan destek aralığı deneysel sonuçlarla uyumu arttırmaktadır. Bu uyum kuvvet-uzama değerlerinde de ayrıca enerji değerlerinde de görülmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasının temel amacı St37 çelikten üretilmiş üç farklı kapalı kesitli (boru, kare ve dikdörtgen) profillerin eğilme davranışlarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesidir.

St37 çelik profillerin eğilme davranışının tanımlanması amacıyla da deney prosesi olarak üç nokta eğme deneyi kullanılmıştır. Üç nokta eğme deneyi sabit hız ve sabit deplasman da gerçekleştirilmiştir. Deneyler iki tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında test cihazından elde edilen kuvvet-uzama verileri ile St37 profillerin kuvvet-uzama grafikleri elde edilmiştir. Daha sonrasında elde edilen kuvvet-uzama grafikleri moment-açı grafiklerine dönüştürülmüştür. Son olarak ise malzemenin enerji absorbe karakteristliğinin belirlenebilmesi amacıyla kuvvet-uzama eğrisi altında kalan alandan enerji değerleri elde edilmiştir.

Tezin bir sonraki aşaması olan nümerik çalışmada ise malzemenin plastik davranışını tanımlayan plastisite modellerinden günümüzde en sık kullanılan Hill-48 ve Barlat-89 malzeme modelleri ile çalışılmıştır. Hill-48 malzeme modeli gerilme tabanlı ve anizotropi katsayısı temelli olarak iki versiyonu ile kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde de kuvvet-uzama verileri alınmış ve grafikler elde edilmiştir. Bu kuvvet-uzama verileri ile enerji değerleri elde edilmiş ve bu deneysel sonuçlarla kıyaslanması sütun grafikleri halinde verilmiştir.

Tez çalışmasının deneysel bölümünde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, boru kesite sahip profillerin kuvvet-uzama verileri artan destek aralıklarında bir azalma sergilemiştir. 160 mm destek aralığında 8 mm uzama da, 200 mm destek aralığında ise 3 mm uzamada 100 mm destek aralığına göre bir azalma söz konusudur. Kare kesite sahip profillerin kuvvet-uzama verileri incelendiğinde ise, boru kesitte olduğu gibi artan destek aralığı ile kuvvet değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. 160 mm ve 200 mm destek aralıkların da 2 mm uzama mesafesinde kuvvet değerleri 100 mm destek aralığına göre düşüş sergilemiştir. Boru kesitte olduğu gibi kare kesitte de artan destek aralıklarında kuvvet azalma göstermiştir. Dikdörtgen kesitte ise boru ve kare kesite benzer olarak artan destek aralıklarında kuvvet değerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca kare kesitte olduğu gibi 160 mm ve 200 mm destek aralıkların da 2 mm uzama mesafesinde kuvvet değerleri 100 mm destek aralığına göre düşüş göstermiştir.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde, kuvvet-uzama grafiklerinin moment-açı grafiklerine dönüştürülmesi mevcuttur. Kuvvet-uzama grafiklerinin aksine moment-açı grafiklerinde tüm kesitlerde artan destek aralıklarında momentte artış görülmektedir. Boru

kesitte moment değeri maksimum 565 kNmm ye ulaşırken, kare kesitte ise maksimum 1728 kNmm ye ulaşmıştır. Son olarak ise dikdörtgen kesitte 973 kNmm ye ulaşmıştır. Tüm kesitlerin maksimum değeri de 200 mm destek aralığında meydana gelmiştir. Moment değerinin en yüksek olduğu kesit ise kare kesit olarak görülmektedir.

Deneyisel çalışmanın son bölümünü ise enerji hesabı oluşturmaktadır. Tüm kesitlerde enerji değerleri artan destek aralıkları ile azalma sergilemiştir. Enerji değerinin en yüksek olduğu kesit profili ise kare kesittir. En düşük enerji değeri ise boru kesitli profillerden elde edilmiştir.

Deneyisel çalışmanın sonrasında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda kuvvet-uzama verileri incelendiğinde, boru kesit profillerin 100 mm destek aralığında gerilme tabanlı Hill-48 modeli ve Barlat-89 malzeme modellerinin deneyisel sonuçlarla uyumlu olduğu görülürken, 20 mm uzama mesafesinden sonra sapma meydana gelmektedir. Anizotropi tabanlı Hill-48 modeli deneyisel sonuçlar ile diğer malzeme modellerinden farklı olarak bir miktar sapma göstermiştir. 160 mm ve 200 mm destek aralığının her ikisinde de gerilme tabanlı Hill-48 modeli ve Barlat-89 malzeme modeli deneyisel veriler ile uyum yakalamıştır. Anizotropi tabanlı Hill-48 modeli ise diğer modellere nazaran bir miktar sapma göstermiştir. Kare kesitli profillerde ise tüm destek aralıklarında üç malzeme modeli birbirine uyumlu sonuçlar verirken, deneyisel verilerden yaklaşık 4 mm uzama bölgesinde sapma sergilemektedirler. Dikdörtgen kesitli profillerde de kare kesitli profillere benzer durum söz konusudur. Fakat dikdörtgen kesitli profillerde kuvvet değerleri kare profil kesitlere nazaran daha düşüktür. Boru kesitli profillerin kuvvet değerleri diğer iki profile göre daha düşüktür.

Sonlu elemanlar analizleri neticesinde elde edilen son veriler enerji değerlerinin hesabıdır. Boru kesit profiller üç destek aralığında da deneyisel verilerle uyum sergilemektedir. Destek aralığının artması ile enerji değerlerinde de azalma meydana gelmiştir. Kare kesitli profillerde enerji değerleri deneyisel veriler ile uyumlu sonuçlar göstermemiştir. Fakat artan destek aralığı ile deneyisel sonuçlarla yakınsama da artmıştır. Dikdörtgen kesit profillerin enerji değerlerinde de deneyisel verilerle uyumlu sonuç göstermemiştir. Artan destek aralıkları ile plastisite modellerinin deneyisel verilerle yakınsama artmıştır. Üç kesitin enerji değerleri karşılaştırıldığında ise kare kesitte en fazla enerji değeri, en düşük enerji değeri ise boru kesitte meydana gelmiştir. Sonuçlar genel itibari ile değerlendirildiğinde üç plastisite modelinin genel anlamda birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tez çalışmasının deneysel bölümünde tüm kesit profilleri aynı deplasman değerine sahiptir. Aynı deplasman değerinde tüm kesitler destek aralığının artışına aynı tepkiyi vermiştir. Tüm kesit de artan destek aralığı ile birlikte absorbe edilen enerji miktarlarında bir düşüş meydana gelirken, aynı deplasman değerinde en yüksek enerji absorpsiyon değerine ulaşan 100 mm destek aralığında kare kesit olmuştur.

Nümerik çalışmalar incelendiğinde ise boru kesitin diğer iki kesite nazaran deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Boru kesitte deneysel sonuçlarla uyum sağlayan Barlat-89 ve gerilme tabanlı Hill-48 modelleri olmuştur. Diğer kesitler ise deneysel sonuçlar ile göz ardı edilemeyecek kadar büyük farklılık göstermiştir. Tez çalışmasında kullanılan malzeme modelleri boru kesit için uygunken kare ve dikdörtgen kesit için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. İlerleyen çalışmalarda tahmin hassasiyeti için daha gelişmiş plastisite modellerinin kullanımı ile deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar arasındaki farkların azaltılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Atasaral, H.** (2009). *Soğuk Şekillendirilmiş Çok Parçalı Hafif Çelik Kolonların Merkezi Yükleme Altında Davranışı*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Alghamdi, A. A. A.** (2001). Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview. *Thin-Walled Structures*. 39, 189–213.
- Bahman, A. R., and Alialhosseini, E.** (2010). Change in hardness, yield strength and UTS of welded joints produced in St37 grade steel. *Indian Journal of Science and Technology*, 3, 12.
- Balta, B.** (2016). *Sürtünme Kaynağı Ve MIAB Kaynağı İle Birleştirilmiş Boruların Mikroyapısal ve Mekanik Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Bai, J., Meng, G., Wu, H., & Zuo, W.** (2019). Bending collapse of dual rectangle thin-walled tubes for conceptual design. *Thin-Walled Structures*. 135, 185-195.
- Banabic, D.** (2010). *Sheet Metal Forming Processes-Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Springer, NewYork, USA.
- Barlat, F., & Lian, K.** (1989). Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International journal of plasticity*, 5(1), 51-66.
- Baroutaji, A., Sajjia, M., & Olabi, A. G.** (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers:Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*. 118, 137-163.
- Bauser, M.; Sauer, G.; Siegert, K.** (2006). *Extrusion*, 2nd edn. ASM International, *Materials Park*.
- Bozacı, F. F.** (2007). *İnce Cidarlı Kapalı Enkesitli Çubuklardan Oluşan Sistemlerin Düşüm Noktası Birleşimlerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bozacı, E.** (2019). *Çelik Endüstri Yapılarında Maliyet Modeli Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Chen, W. (2001). Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 7919-7944.

Chen, D., Sun, G., Jin, X., & Li, Q. (2020). Quasi-Static Bending and Transverse Crushing Behaviors for Hat-Shaped Composite Tubes Made of CFRP, GFRP and Their Hybrid Structures. *Composite Structures*. (239), 111842.

Clough, R. W. (1960). The Finite Element Method in Plane Stress Analysis. *American Society of Civil Engineers*.

Crupi, V., and Montanini, R. (2007). Aluminium Foam Sandwiches Collapse Modes Under Static and Dynamic Three-Point Bending. *International Journal of Impact Engineering*. (34), 509–521.

Çeğil, Ö., and Şen, Ş. (2002). AISI 8620 Çeliginin Bor-Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6, 3.

Çetin, M. S. (2007). *Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Çetin, E. (2020). *Kafes Yapı Dolgulu İnce Cidarlı Tüplerin Çarpışma Davranışlarının Sayısal Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.

Dökmeci, M. ve Apay, S. (2017). İki Farklı Metodla Üretilen Çelik Boru Profillerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Published in 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku - Azerbaijan)*.

Duarte, I., Vesenjaj, M. & Krstulovic-Opara, L. (2014). Dynamic and Quasi-Static Bending Behaviour of Thin-Walled Aluminium Tubes Filled with Aluminium Foam. *Composite Structures*. (109), 48-56.

Eroğlu, H. E. (2019). *UPE Çelik Konsol Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulmasının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Esener, E. (2015). *Plastik Şekil Verme Proseslerinde Form ve Şekillendirme Hatalarının Telaft Edilmesi*. Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.

Esener, E. (2020). Plastisite Modellerinde Pekleşme Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi İle Tespiti. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. 11:1, 171-181.

Esmailpour, R., Kim, H., Park, T., Pourboghrat, F., Xu, Z., Mohammed, B., Abu-Farha, F. (2018) “Calibration of Barlat Yld2004-18P yield function using CPFEM and 3D RVE for the simulation of single point incremental forming (SPIF) of 7075-O aluminum sheet”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 145, ss.24-41.

Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zhang, Y. & Li, Q. (2014). Parametric Analysis and Multiobjective Optimization for Functionally Graded Foam-Filled Thin-Wall Tube Under Lateral Impact. *Computational Materials Science*. (90), 265-275.

Fenkli, M., Kımıllı, N. A., Çelik, İ. D., Sivri, M., & Ay, Z. (2015). *Kutu Kesitli Kiriş-Kolon Birleşiminde Mesh Kalitesinin Şekil Değiş-tirmeye Etkisi*. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 19(1), 34-39.

Feng, D. C., Ren, X. D., Li, J. (2018) “Cyclic behavior modeling of reinforced concrete shear walls based on softened damage-plasticity model”, *Engineering Structures*, 166, ss.363-375.

Güler, B. (2005). *Türk İnşaat Sektöründe Yapısal Çelik Üretim - Örgütlenme – Uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Günay, M. G. (2013). *İnce Cidarlı Kompozit Kirişlerin Statik Ve Dinamik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Gürsoy, Ö.K. (2019) “Plastisite Modellerinin Sac Metal Formlama Sonlu Elemanlar Analizleri Üzerine Etkilerinin Tespiti”, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

Gürsoy, Ö.K. Esener, E. (2019) “Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi”, *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (1), ss.1-11.

Hill, R. (1948) “A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals”, *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 193, pp. 281-297.

Hilditch, T., Atwell, D., Easton, M. & Barnett, M. (2009). Performance of Wrought Aluminium and Magnesium Alloy Tubes in Three-Point Bending. *Materials and Design*. (30), 2316-2322.

- Huang, Z., and Zhang, X.** (2018). Three-Point Bending Collapse of Thin-Walled Rectangular Beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. (144), 461-479.
- Huang, Z. & Zhang, Z.** (2019). Three-Point Bending of Thin-Walled Rectangular Section Tubes with Indentation Mode. *Thin-Walled Structures*. (137), 231-250.
- Huang, Z., Zhang, X. & Yang, C.** (2020a). Experimental and Numerical Studies on The Bending Collapse of Multi-Cell Aluminum/CFRP Hybrid Tubes. *Composites Part B*. (181), 107527.
- Huang, Z., Zhang, X. & Fu, X.** (2020b). On The Bending Force Response of Thin-Walled Beams Under Transverse Loading. *Thin-Walled Structures*. (154), 106807.
- İnternet, Tubular products (arcelormittal.com)** (Ziyaret Edilme Tarihi: 05.01.2021)
- Javanmardi, M. R., Maheri, M. R.** (2019) “Extended finite element method and anisotropic damage plasticity for modelling crack propagation in concrete”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 165, ss.1-20.
- Karaçalı, G.** (2015). *Soğuk Haddelenmiş Çift Fazlı DP600 Kalite Çeliklerin Yaşlanma Davranışının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kecman, D.** (1983). Bending Collapse of Rectangular And Square Section Tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25 (9-10):623-636.
- Kotelko, M., Lim, T. H. & Rhodes, J.** (2000). Post-Failure Behaviour of Box Section Beams Under Pure Bending (An Experimental Study). *Thin-Walled Structures*. (38), 179-194.
- Kim, T. H. & Reid, S. R.** (2001). Bending Collapse of Thin-Walled Rectangular Section Columns. *Computers & Structures*, 79 (20-21):1897-1911.
- Li, Z., Zheng, Z., Yu, J. & Guo, L.** (2013). Crashworthiness of Foam-Filled Thin-Walled Circular Tubes Under Dynamic Bending. *Materials and Design*. (52), 1058-1064.
- Liu, Q., Xu, X., Ma, J., Wang, J., Shi, Y. & Hui, D.** (2017). Lateral Crushing and Bending Responses of CFRP Square Tube Filled with Aluminum Honeycomb. *Composites Part B*. (118), 104-115.

- Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Loannidis, M. B. & Kostazos, P. K.** (2006). Bending of cylindrical steel tubes: numerical modelling. *International Journal of Crashworthiness*. 11(1), 37-47.
- Mamalis, A. G., Varvarigou, T. A., Litke, A. O., Manolakos, D. E., Loannidis, M. B., Kostazos, P. K., Andronikou, V. I. & Karanastasis, E. A.** (2008). Bending of Cylindrical Steel Tubes: Numerical Simulation Using Grid Computing. *International Journal of Crashworthiness*. 13(1), 109-116.
- Meng, L., Chen, W., Yan, Y., Kitamura, T., Feng, M.** (2019) “Modelling of creep and plasticity deformation considering creep damage and kinematic hardening”, *Engineering Fracture Mechanics*, 218, 106582.
- More, K. C., Patil, G. M., Belkhede, A. A.** (2020) “Design and analysis of side door intrusion beam for automotive safety”, *Thin-Walled Structures*, 153, 106788.
- Mo'tamedi, M., Zeinoddini, M. & Elchalakani, M.** (2018). A Closed-Form Analytical Solution for The Ratcheting Response of Steel Tubes With Wall-Thinning Under Inelastic Symmetric Constant Amplitude Cyclic Bending. *Thin-Walled Structures*, (132), 558-573.
- Nagel, G.M. & Thambiratnam, D.P.** (2004). A Numerical Study on the Impact Response and Energy Absorption of Tapered Thin-walled Tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 201-216.
- Nieto, J. T.** (2010). Feature based costing of extruded parts. PhD Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign.
- Orhan, S.** (2008). *Yüksek Frekans Kaynağı İle Birleştirilen Çelik Profillerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Öztürk, M.** (2008). *Çelik Taşıyıcı Sistemli Yapılarda Taşıyıcı Yapı Elemanlarının Farklı Malzemeli Yapı Bileşenleri İle Bağlantılarının İrdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Qamar, S. Z.; Arif, A. F. M.; Sheikh, A. K.** (2003). An investigation of shape complexity in metal extrusion. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies AMPT*, Dublin, Ireland, July 8–11, pp. 1178–1183.

Qamar, S.Z. (2010). Shape complexity, metal flow, and dead metal zone in cold extrusion. *Mater. Manuf. Processes* 25(12), 1454–1461.

Qamar, S. Z., Chekotu, J. C., Al-Maharbi, M., Alam, K. (2019). Shape Complexity in Metal Extrusion: Definitions, Classification, and Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*.

Qi, C., Sun, Y., Hu, H. T., Wang, D-Z., Cao, G-J. & Yang, S. (2016). On Design of Hybrid Material Double-Hat Thin-Walled Beams Under Lateral Impact. *International Journal of Mechanical Sciences*. (118). 21-35.

Reyes, A., Hopperstad, O. S., Hanssen, A. G. & Langseth, M. (2004). Modeling of Material Failure in Foam-Based Components. *International Journal of Impact Engineering*. (30), 805–834.

Saha, P. K. (2000). Aluminum Extrusion Technology. *ASM International*.

Santhosh K. V., and Manikandaraja, G. (2016). Numerical study on energy absorbing characteristics of thin-walled tube under axial and oblique impact. *Alexandria Engineering Journal*, 55, 187-192.

Sezan, H. T. (2010). *İnce Cidarlı 6063-T6 Alüminyum Tüpün Yük Taşıma Kabiliyetinin Arttırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Slater, R. C. (1977) “Engineering and Plasticity: Theory and Application to Metal Forming Processes”, *Macmillan International Higher Education*, London, UK, 419.

Soare, S. C., Barlat, F. (2011) “A study of the Yld2004 yield function and one extension in polynomial form: A new implementation algorithm, modeling range, and earing predictions for aluminum alloy sheets”, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 30(6), ss.807-819.

Solomon, M. M., Gerengi, H., Kaya, T., Kaya, E., and Umoren, S. A. (2017). Synergistic inhibition of St37 steel corrosion in 15% H₂SO₄ solution by chitosan and iodide ion additives. *Cellulose*, 24, 931-950.

Sun, G., Tian, X., Fang, J., Xu, F., Li, G. & Huang, X. (2015). Dynamical Bending Analysis and Optimization Design for Functionally Graded Thickness (FGT) Tube. *International Journal of Impact Engineering*. (78), 128-137.

Şen, H. (2015). *Levhaların Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Takahashi, M. (2003). Development of High Strength Steels for Automobiles.” Nippon Steel Technical Report.

Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., and Topp, L. J. (1956). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of The Aeronautical Sciences*, (23) 9.

Ünver, H. (2003). *Çelik Yapı Detaylarının Taşıyıcı Sistemler Açısından İrdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, İstanbul.

Vesenjak, M., Duarte, I., Baumeister, J., Göhler, H., Krstulovic-Opara, L. & Ren, Z. (2020). Bending Performance Evaluation of Aluminium Alloy Tubes Filled with Different Cellular Metal Cores. *Composite Structures*. (234), 111748.

Wagström, L., Thomsom, R., & Pipkorn, B. (2005). Structural adaptivity in frontal collisions: implications on crash pulse characteristics. *International Journal of Crashworthiness*. 10(4), 371-378.

Wang, Z., Li, Z. & Zhang, X. (2016). Bending Resistance of Thin-Walled Multi-Cell Square Tubes. *Thin-Walled Structures*. (107). 287-299.

Wang, Z., Li, Z. & Xiong, W. (2019). Numerical Study on Three-Point Bending Behavior of Honeycomb Sandwich with Ceramic Tile. *Composites Part B*. (167), 63-70.

Wang, J., Cheng, X., Yan, L. & Wu, C. (2020). Numerical Study on I-Section Steel-Reinforced Concrete-Filled Steel Tubes (SRCFST) Under Bending. *Engineering Structures*. (225), 111-276.

Wardenier, J., Dutta, D., Yeomans, N., Packer, J., Bucak, Ö. & Sakae, K. (2001). (çeviren: İnş. Y. Müh. Dr. Halet Almila Büyüktaşkın) – “*Kutu ve Boru Profillerden Oluşan Çelik Konstrüksiyon Yapıların İmalat, Çatım ve Yerinde Montaj Esasları Hakkında Tasarım El Kitabı*”, Borusan Birleşik Boru Fabrikaları A.Ş., İstanbul.

Witteman, W. J. (1999). Improved vehicle crashworthiness design by control of the energy absorption for different collision situations. *Eindhoven University of Technology*.

- Xiang, X. M., Lu, G. & Wang, Z. H.** (2015). Quasi-Static Bending Behavior of Sandwich Beams with Thin-Walled Tubes As Core. *International Journal of Mechanical Sciences*. (103), 55-62.
- Xiao, Z., Fang, J., Sun, G. & Li, Q.** (2015). Crashworthiness Design for Functionally Graded Foam-Filled Bumper Beam. *Advances in Engineering Software*. (85), 81-95.
- Xiong, Z., and Hui, Z.** (2018). Static And Dynamic Bending Collapse of Thin-Walled Square Beams with Tube Filler. *International Journal of Impact Engineering*. (112), 165-179.
- Yazdani, M., Toroghinejad, M. R., and Hashemi, S. M.** (2015). Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of St37 Steel-Ck60 Steel Joints by Explosive Cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(10), 4032-4043.
- Yıldız, H., and Kırılı, O.** (2004). Derin Çekme İşleminin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.10(3):317-326.
- Yin, H., Xiao, Y., Wen, G., Qing, Q. & Deng, Y.** (2015). Multiobjective Optimization for Foam-Filled Multi-Cell Thin-Walled Structures Under Lateral Impact. *Thin-Walled Structures*. (94). 1-12.
- Yüce, C.** (2013). *Yeni Nesil Ticari Araçlar İçin Hafifletilmiş Yolcu Koltuğu Tasarımı Ve Prototip İmalatı*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Zhang, J., Zhou, H., Wu, L. & Chen, G.** (2015). Bending Collapse Theory of Thin-Walled Twelve Right-Angle Section Beams Filled With Aluminum Foam. *Thin-Walled Structures*. (94), 45-55.
- Zhang, X., Zhang, H. & Wang, Z.** (2016a). Bending Collapse of Square Tubes with Variable Thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*. (106), 107-116.
- Zhang, X., Zhang, H. & Ren, W.** (2016b). Bending Collapse of Folded Tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. (117), 67-78.
- Zhang, Y., Xu, X., Liu, S., Chen, T. & Hu, Z.** (2018). Crashworthiness Design for Bi-Graded Composite Circular Structures. *Construction and Building Materials*. (168), 633-649.

Zhang, X., Zhang, H. & Leng, K. (2018). Experimental and Numerical Investigation on Bending Collapse of Embedded Multi-Cell Tubes. *Thin-Walled Structures*. (127), 728-740.

Zhang, H., Sun, G., Xiao, Z., Li, G. & Li, Q. (2018). Bending Characteristics of Top-Hat Structures Through Tailor Rolled Blank (TRB) Process. *Thin-Walled Structures*. (123), 420-440.

Zhang, Y., Yan, L., Zhang, W., Su, P., Han, B. & Guo, S. (2019). Metallic Tube-Reinforced Aluminum Honeycombs: Compressive and Bending Performances. *Composites Part B*. (171), 192-203.

Zhou, R., Roy, A., Silberschmidt, V. V. (2019) “A crystal-plasticity model of extruded AM30 magnesium alloy”, *Computational Materials Science*, 170, 109140.

Zhu, Y. X., Liu, Y. L., Yang, H. & Li, H. P. (2012). Development And Application Of The Material Constitutive Model in Springback Prediction of Cold-Bending. *Materials and Design*. 42, 245-258.

Zhu, G., Wang, Z., Cheng, A. & Li, G. (2017). Design Optimisation of Composite Bumper Beam With Variable Cross-Sections for Automotive Vehicle. *International Journal of Crashworthiness*. 22(4), 365-376.

URL-1:[Eriřim: 08.04.2021, <https://www.hascometal.com/dikissiz-celik-cekme-borular/dikissiz-boru-uretimi>]

URL-2: [Eriřim: 06.04.2021, <https://www.uslularhadde.com/ceik-boru-uretimi>]

URL-3:[Eriřim: 01.04.2021, <https://www.yucelboru.com.tr/medya/YucelBoru-Brosur-TR.pdf>]

URL-4: [Eriřim: 07.04.2021, <https://www.pusatmetal.com.tr/dikissiz-celik-cekme-boru.html/>]

URL-5: [Eriřim: 5.06.2022, <https://ankmetal.com/category/urunler/borular/>]

URL-6: [Eriřim:07.04.2021,[https://www.hascelik.com/teknik-katalog/files/hascel%C4%B1k%20 katalog.pdf](https://www.hascelik.com/teknik-katalog/files/hascel%C4%B1k%20katalog.pdf)]

URL-7: [Eriřim: 07.04.2021, <https://www.oraysan.com.tr/demir-28-kutu-profil-ve-borular.html>]